DE LA BRÚJULA AL ESPÍN. EL MAGNETISMO

Autor: JULIA TAGÜEÑA / ESTEBAN MARTINA

- COMITÉ DE SELECCIÓN
- EDICIONES
- PREFACIO
- I. ASPECTOS HISTÓRICOS: ORÍGENES Y DESARROLLO DE LA TEORÍA DEL MAGNETISMO
- II. EL MAGNETISMO Y LA LUZ (DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA)
- III. EL MAGNETISMO Y EL ÁTOMO: DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA
- IV. EL MAGNETISMO EN LA NATURALEZA: SUS MANIFESTACIONES EN LO INANIMADO Y EN LOS SERES VIVOS
- V. EL MAGNETISMO Y SUS APLICACIONES EN EL MUNDO MODERNO
- BIBLIOGRAFÍA
- COLOFÓN
- CONTRAPORTADA

COMITÉ DE SELECCIÓN

Dr. Antonio Alonso

Dr. Gerardo Cabañas

Dr. Juan Ramón de la Fuente

Dr. Jorge Flores Valdés

Dr. Leopoldo García-Colín Scherer

Dr. Tomás Garza

Dr. Gonzalo Halffter

Dr. Raúl Herrera

Dr. Jaime Martuscelli

Dr. Héctor Nava Jaimes

Dr. Manuel Peimbert

Dr. Juan José Rivaud

Dr. Julio Rubio Oca

Dr. José Sarukhán

Dr. Guillermo Soberón

Coordinadora:

María del Carmen Farías

Julia Tagüeña

Esteban Martina

Inicio

EDICIONES

Primera edición (La Ciencia desde México), 1988

Cuarta reimpresión 1995

Segunda edición (La Ciencia para Todos) 1997

Se prohibe la reproducción total o parcial de esta obra

—incluido el diseño tipográfico y de portada—, sea cual fuere el medio; electrónico o mecánico, sin el consentimiento por escrito del editor.

La Ciencia para Todos es proyecto y propiedad del Fondo de Cultura Económica, al que pertenecen también sus derechos. Se publica con los auspicios de la Secretaría de Educación Pública y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

D. R. © 1988 FONDO DE CULTURA ECONÓMICA, S.A. DE C. V.

D. R. © 1997 FONDO DE CULTURA ECONÓMICA

Carretera Picacho-Ajusco 227, 14200 México, D.F.

ISBN 968-16 5220-7

Impreso en México

Inicio

PREFACIO

El electromagnetismo es uno de los pilares más importantes de la ciencia y la tecnología modernas. No es posible separar el magnetismo de su relación con la electricidad, y el cúmulo de conocimientos en ambas áreas es enorme. Ante la imposibilidad de ofrecer una visión a la vez completa y profunda de tan vasto tema, hemos escogido presentar una visión panorámica.

Expondremos las bases tanto macroscópicas como microscópicas de la teoría, algunas aplicaciones del magnetismo, así como una revisión histórica de su desarrollo. Es difícil concebir el efecto que sobre la tecnología ha tenido el electromagnetismo y cómo los avances logrados han incidido e inciden en nuestra vida cotidiana. Es por eso que consideramos fundamental que el público en general, sobre todo la gente joven, conozca las teorías que explican el funcionamiento de muchos de los aparatos e instrumentos que usa continuamente.

Esperamos que este libro despierte el interés de los que lo lean y los incite a profundizar más en el estudio del magnetismo. Hay que añadir que esta ciencia es una rama de la física no terminada aún, sino que se encuentra en plena expansión, y que aunque se ha recorrido un largo camino desde que el hombre empezó a usar la brújula, todavía quedan muchas interrogantes.

JULIA TAGÜEÑA ESTEBAN MARTINA

Ciudad Universitaria, mayo de 1986

Inicio

I. ASPECTOS HISTÓRICOS: ORÍGENES Y DESARROLLO DE LA TEORÍA DEL MAGNETISMO

INTRODUCCIÓN:

LA ANTIGUA CIENCIA DEL MAGNETISMO

ELECTRICIDAD y magnetismo son aspectos diferentes de un mismo fenómeno. Cuando el científico medita sobre las propiedades y el movimiento de las cargas eléctricas, ambos fenómenos aparecen en forma conjunta. Sin embargo, la íntima relación entre electricidad y magnetismo sólo se comenzó a estudiar en forma sistemática a partir del siglo pasado, y aún ahora el lego en la materia piensa que estos fenómenos no tienen nada que ver entre sí, a pesar de que vive rodeado de aparatos que muestran esta interrelación. Esto explica el desarrollo del magnetismo como ciencia, ya que en la Antigüedad y hasta el siglo XVIII se estudiaba el magnetismo de manera independiente, es decir, sin tomar en cuenta a la electricidad.

Fueron probablemente los griegos quienes primero reflexionaron sobre las maravillosas propiedades de la magnetita, un mineral de hierro que incluso en estado natural posee una profunda atracción por el hierro. De hecho, Tales de Mileto alrededor del 600 a.C. ya habla del imán en forma detallada. Esto no excluye que éste ya se conociese en el resto del mundo. Por otra parte, Platón (428-348 a.C.) en su diálogo Ión hace decir a Sócrates que la magnetita no sólo atrae anillos de hierro, sino que les imparte un poder similar para atraer a otros anillos. De esta manera se forman cadenas de anillos colgados unos con respecto a otros. Estos son los llamados anillos de Samotracia, isla griega donde los mineros habían descubierto este fenómeno que en la actualidad llamamos magnetización por inducción. Diversas leyendas envuelven los orígenes del descubrimiento del magnetismo. De acuerdo con una de ellas, el pastor Magnes (de allí magnetismo) se quedó pegado a la tierra, ya que los clavos de sus zapatos fueron atraídos por la magnetita. Según otra versión, el nombre magnetismo viene de Magnesia, región de Grecia donde abunda el mineral. Otras leyendas nos hablan de estatuas de hierro suspendidas en el aire debido a su colocación en domos magnéticos.

Siendo los griegos un pueblo que se interesaba por la Naturaleza, no es de extrañar que surgieran teorías para explicar las maravillas del magnetismo. Sin embargo, no debe pensarse que el verbo explicar tenía el mismo sentido para ellos que para nosotros. Para los griegos explicar significaba encuadrar los fenómenos naturales dentro de un esquema filosófico preconcebido y no investigarlos para crear una teoría con poder predictivo.

De esta manera era lógico que surgieran diversas escuelas tales como los animistas, los mecanicistas y otras, entre las que destacaban las que sostenían que el magnetismo se debía a emanaciones o "efluvios". De hecho, uno de los pasajes sobre el magnetismo más extenso que se encuentra en la literatura grecorromana es el de Lucrecio Caro, que en el sexto libro de *De Rerum Natura* (55a.C.) un vasto poema épico, describe las maravillas del imán con base en las teorías de Epicuro y Demócrito.

Puesto que éstos eran los fundadores de la teoría atómica, era de esperarse que el magnetismo se atribuyera a que el imán exhala partículas que penetran a través de los poros del hierro y que, al crearse el vacío, hacen que el hierro se sienta atraído al imán. Lucrecio consigue además dar una explicación ingeniosa de por qué al poner un objeto de bronce entre el hierro y el imán ocurre una repulsión. Por supuesto, las "explicaciones" de Lucrecio no son tales a la luz de la ciencia actual. Sin embargo, demuestran el poder especulativo de un mundo precientífico y están sorprendentemente libres de supersticiones tan en boga entonces (¡y ahora!).

El uso de la "piedra magnética" como brújula se adscribe a los chinos. De acuerdo con ciertas leyendas, Hoang-ti, personaje mítico, construyó una "carroza del sur" *(véase* figura.1)

Se dice que los chinos utilizaban una especie de brújula en el siglo XII a.C., pero hasta el final del siglo XII d. C. no se tiene una clara referencia a un compás marítimo.

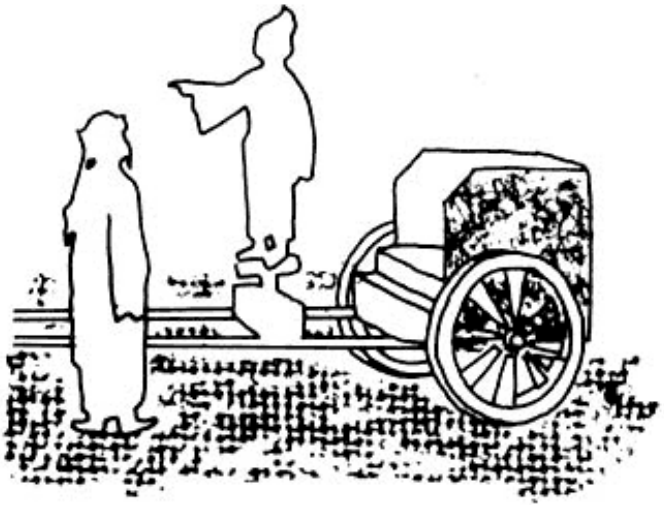


Figura 1. La leyenda dice que Hoang-ti , fundador del Imperio chino, perseguía con sus tropas a un príncipe rebelde y se perdió en la niebla. Para orientarse construyó esta brújula en la cual la figura de una mujer siempre apuntaba al sur. Así atrapó a los rebeldes.

Figura 2. La atracción magnética se concentra en los extremos del imán.

Para ese entonces los europeos habían ya desarrollado una brújula, pues ya en 1200 d.C., Neckam of St. Albans muestra agujas pivotadas que marcan la ruta en su libro *De Utensilibus.* Aproximadamente en la misma época, Guyot de Provoins, un trovador de la corte de Barbarroja, se refiere en la llamada *Bible Guyot* al empleo de una piedra que se utiliza para tocar a una aguja *(véase* figura 2). Ésta se montaba sobre una paja que flotaba y podía girar libremente. El uso de esta brújula de flotación era ya común en el siglo XIII d. C.

El primer tratado europeo importante sobre el magnetismo se debe a Pedro Peregrino de Maricourt, quien el "8 de agosto del año del Señor 1269" escribió su celebrada *Epístola a Sygerius de Foucaucort, soldado.* Este es el primer informe científico (en el sentido moderno de la palabra) del que poseemos noticias. La carta es notable, ya que el relato de los experimentos es lúcido y sucinto. Peregrino distingue claramente los polos de un imán permanente; observa que el norte y el sur se atraen y que polos iguales, norte por ejemplo, se repelen *(véase* figura 3); describe cómo, si se fragmenta un imán, se crean otros polos, y discute sobre la aguja pivotada. Asevera además que es de los polos magnéticos de la Tierra de donde los polos del imán reciben su virtud.

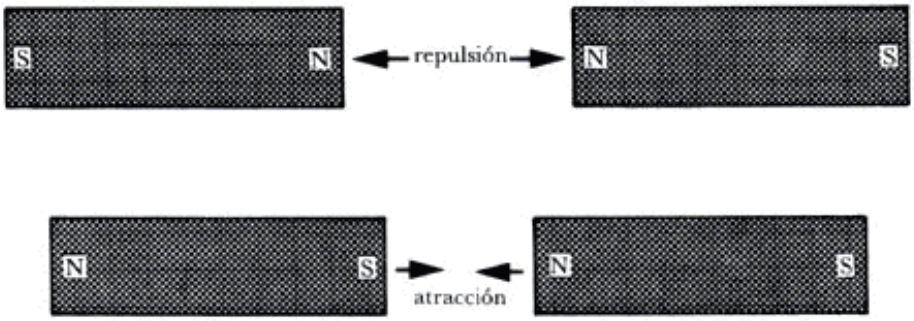


Figura 3. Polos opuestos se atraen y polos iguales se repelen.

Después de Peregrino, varios estudiosos como Baptista Porta o Thomas Browne realizaron experimentos que, aunque alejados de la física moderna, coadyuvaron a depurar de supercherías los conocimientos que poco a poco se iban acumulando sobre los fenómenos magnéticos. Entre éstos sobresale la variación de la declinación de la brújula con la latitud y la inclinación de la aguja imantada, la cual fue observada por Hartmann von Nürnberg en 1544 y descrita por Robert Norman, un fabricante de agujas para brújula.

LA REVOLUCIÓN CIENTÍFICA EN EL MAGNETISMO

Lo que podríamos llamar la etapa precientífica del magnetismo termina y culmina con la aparición de la imponente figura de William Gilbert de Colchester (1544-1603), quien fue el verdadero fundador de la ciencia del magnetismo. Su *Magnete Magnetiasque Corporibus et de Magno Magnete Tellure Physiologia Nova*, usualmente y por fortuna conocido como *De Magnete*, fue publicado en 1600 y puede considerarse como uno de los trabajos claves de la revolución científica que se llevaba a cabo por esas épocas. Gilbert estudió en Cambridge y, después de viajar por el continente, practicó como médico en la corte de la reina Isabel I.

Gilbert fue de los primeros "filósofos naturales" que hizo hincapié en el método experimental y que lo utilizó para ahondar en el conocimiento del magnetismo. En los seis libros de que consta *De Magnete*, Gilbert describe múltiples fenómenos, entre los cuales destaca el cómo la atracción entre el hierro y la magnetita imantada puede ser aumentada "armando" la magnetita, esto es, poniendo casquetes de hierro en las juntas de la piedra, tal y como se muestra en la figura 4. Esto hace que el peso que puede ser levantado aumente en un factor de cinco. Observó además que la atracción se concentra en los extremos de la magnetita. Así, Gilbert detalla cómo se pueden hacer imanes por medio de tres métodos: tocando objetos imantados; por deformación plástica; y fabricando barras de hierro, calentándolas y dejándolas enfriar. De hecho, estos métodos fueron los que se usaron hasta 1820. Observó también que el calor destruye el magnetismo.

Figura 4. Imanes permanentes y círculo inclinado como se presentan en *De Magnete* de Gilbert.

Como puede colegirse de la anterior exposición, Gilbert era un gran experimentalista poco afecto a la especulación. Sin embargo, en el último libro de *De Magnete* presenta sus teorías y trata de encuadrar el

magnetismo en el sistema de Copérnico. Uno de sus éxitos fue el de deducir las propiedades de atracción de polos opuestos y otro el de que la Tierra se comporta como si tuviera un imán enterrado en ella (Figura 5).

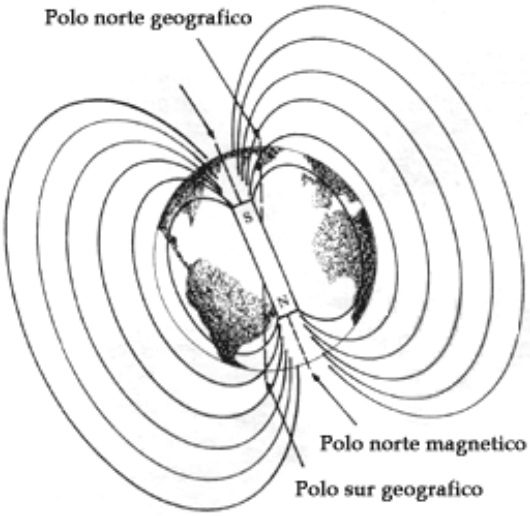


Figura 5. La Tierra se comporta como si tuviera un gran imán enterrado.

En el otro extremo se encuentra el gran filósofo y matemático francés René Descartes (1596-1659), quien no toma muy en cuenta los experimentos pero introduce de lleno el racionalismo en la ciencia. La primera teoría del magnetismo se presenta en la cuarta parte de sus Principia y considera que el ferromagnetismo, esto es, la existencia de imanes permanentes, deriva del magnetismo terrestre. Su teoría de vórtices, que no es másqueuna nueva versión de los efluvios del mundo clásico, no resiste una comparación con los experimentos de Gilbert, pero ejerció una influencia considerable en su época. Descartes marca aparentemente el fin de la influencia metafísica en la ciencia. Por un periodo su idea de que la física puede ser deducida de primeros principios incomprobables parecerá completamente muerta. En cierto sentido, su mecanicismo es parecido al de los griegos. Los mecanicistas que lo siguieron tomaron un punto de vista empírico y descriptivo que no deseaba penetrar en la esencia del objeto estudiado. Sin embargo, el paso clave ocurre cuando la nueva ciencia adopta a las matemáticas como su lenguaje. Este conjunto de primeros principios, si así pueden llamarse, remplaza a la metafísica en la descripción del universo. Galileo ya lo había dicho en 1590: "La filosofía está escrita en un gran libro siempre abierto ante nuestros ojos, pero uno no puede entenderlo sin entender su lenguaje y conocer los caracteres en que está escrito, esto es, el lenguaje matemático."

Este nuevo punto de vista estimula a que los científicos cuantifiquen sus observaciones. En magnetismo, el monje Marsenne, un amigo de Descartes, cuantificó las observaciones de Gilbert. Hacia 1750 John Michelí inventó la balanza de torsión y pudo constatar que "la atracción o repulsión de los imanes decrece cuando los cuadrados de la distancia entre los respectivos polos aumenta". Estas conclusiones, que no concordaban con la teoría de vórtices, dieron origen a nuevas teorías del magnetismo, algunas basadas en el tema de fluidos. La teoría de un fluido propuesta por Gray y Franklin para explicar el flujo de carga eléctrica de un cuerpo a otro fue aplicada al magnetismo por Franz María Aepinus en 1759. Su libro Tentamen Theoria Electricitates et Magnetismi publicado en San Petersburgo dio el golpe de gracia a las teorías basadas en el concepto de efluvio. El descubrimiento por Du Fay en 1733 de que había dos tipos de electricidad hizo que también se propusiera una teoría de dos fluidos para el magnetismo en 1778 por el sueco Wilche y el holandés Brugmans.

El máximo representante de la teoría en esta época fue Charles Coulomb (1736-1806) , quien realizó experimentos cruciales con la balanza de torsión para probar la ley de interacción entre cargas y modificó la teoría de dos fluidos. Coulomb hizo la clara distinción entre cargas eléctricas y cargas magnéticas, pues estas últimas, como ya se mencionó, nunca aparecían desligadas, sino en pares de polos magnéticos. Simon Denis Poisson (1781-1840), un brillante matemático, introdujo el concepto de potencial y desarrolló la teoría de la magnetostática. Tanto Poisson como Coulomb rechazaron cualquier intento de especulación acerca de la naturaleza de los fluidos eléctrico y magnético. Esta actitud positivista prevaleció en forma determinante en la ciencia francesa y, como veremos posteriormente, fue una de las causas por las que los físicos ingleses, y no los franceses, realizaron una síntesis de los fenómenos electromagnéticos.

En resumen, al final del siglo XVIII las características principales de los fenómenos magnetostáticos habían sido descubiertas y se interpretaban con base en la teoría de dos fluidos, combinados con el concepto de acción a distancia implícito en la ley del inverso del cuadrado de la distancia. Es claro que tanto la fuerza eléctrica como la magnética y la gravitatoria se distinguen de las llamadas fuerzas de contacto, como lo son la fricción o un simple empujón, en el hecho de que actúan aun cuando los cuerpos no se toquen. De esta manera se empezó habland9de la mencionada acción a distancia, pero el lenguaje moderno se frasea en términos de los llamados "campos", concepto en el que profundizaremos más adelante. Matemáticamente se había avanzado considerablemente con las investigaciones de Poisson, quien, entre otras cosas, discutió la inducción magnética. La construcción de imanes permanentes había alcanzado un alto grado de refinamiento en Inglaterra (Figura 6).

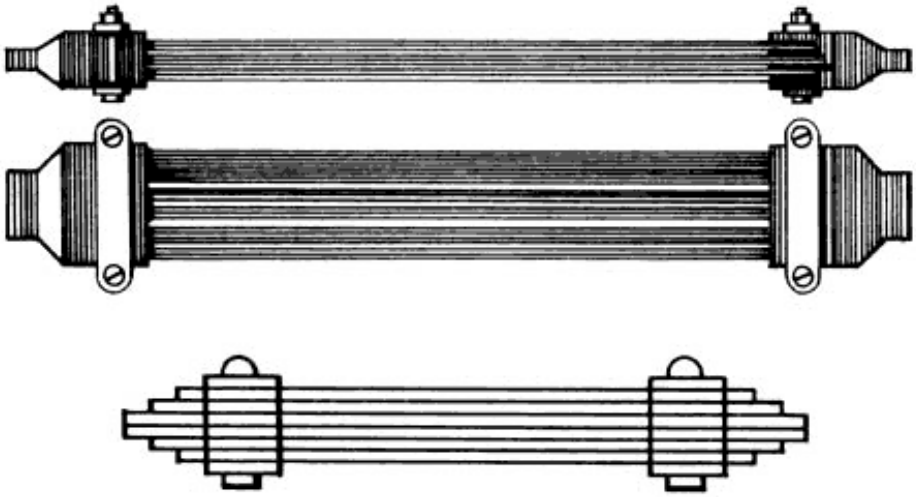


Figura 6. Diferentes tipos de imanes permanentes.

Así pues, el escenario estaba preparado para la irrupción de conocimientos sobre el electromagnetismo que el naciente siglo XIX estaba por traer.

LA UNIÓN DEL MAGNETISMO Y LA ELECTRICIDAD

Por una feliz coincidencia, el punto culminante en el desarrollo del magnetismo como una ciencia separada fue alcanzado justamente cuando se hacían los primeros descubrimientos que lo conectaban con la electricidad. Por supuesto, desde hacía tiempo se había notado que la brújula cambiaba de dirección cuando los rayos en una tormenta caían cerca de un barco. Sin embargo, fue solamente a principios del siglo XIX cuando se empezó a investigar la influencia que tenía la electricidad sobre una aguja magnética. Estos experimentos fueron estimulados por la invención de la pila voltaica alrededor de 1800 y, ya desde 1801, el físico danés Hans Christian Oersted (1777-1851) estaba buscando la interrelación entre una corriente eléctrica y una aguja magnética. No fue sino hasta 1819, y por accidente, cuando notó que la aguja magnética se movía cuando pasaba corriente por un alambre paralelo a la misma. Esto era algo sorprendente, pues nunca se había esperado una fuerza transversal. Oersted publicó una memoria sobre sus experimentos que causó gran sensación. Dichos experimentos fueron reproducidos por Mago ante la academia francesa. Siete días después del reporte de Arago (el 18 de septiembre de 1820), André Marie Ampeère (1755-1836) sugirió que el ferromagnetismo era originado por corrientes eléctricas internas y que éstas fluían perpendicularmente al eje del imán.

Los físicos ingleses les iban pisando los talones a sus colegas franceses, pues ya el 16 de noviembre Sir Humphry Davy reportaba resultados similares a los de Arago. De esta manera se inició una especie de competencia entre ambos lados del Canal de la Mancha para establecer la prioridad de los resultados.

En 1813, Michael Faraday (1791-1867), contando entonces con 23 años y siendo aprendiz de encuadernador, fue contratado por Davy como su ayudante en la Royal Institution. Faraday, sin lugar a dudas uno de los grandes genios de la física, tenía un tremendo poder de visualización, el cual, al combinarse con su gran paciencia y habilidad observacional, lo llevó a una vida de descubrimientos casi sin paralelo en la historia de la ciencia. Así, en 1831 descubrió la inducción electromagnética. Indudablemente fue su capacidad de ver las líneas de fuerza que salían del imán lo que le permitió observar este fenómeno en diez días de febril investigación. En sus propias palabras: ".. . se describieron y definieron ciertas líneas alrededor de una barra imán [aquellas que se visualizan

esparciendo limaduras de hierro en la vecindad de éste, como se muestra en la figura 7] y se reconocieron como descripción precisa de la naturaleza, condición, dirección e intensidad de la fuerza en cualquier región dada, dentro y fuera de la barra. Esta vez las líneas se consideraron en abstracto. Sin apartarse en nada de lo dicho, ahora emprenderemos la investigación de la posible y probable existencia física de tales líneas..." y concluye diciendo: "la cantidad de electricidad que se vuelve corriente es proporcional al número de líneas de fuerza interceptadas."

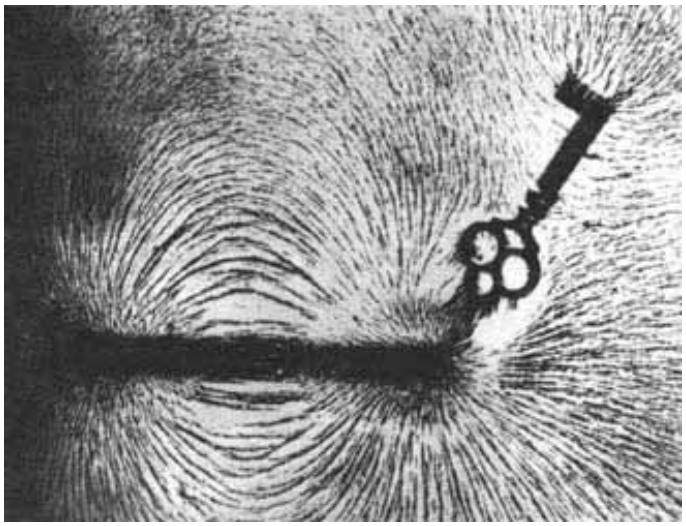


Figura 7. Limadura de hierro espolvoreado sobre un papel, el cual se encuentra sobre un imán

Faraday estableció claramente que las sustancias magnéticas interactúan unas con otras mediante las líneas de fuerza, hoy llamadas líneas de campo, y no mediante una "acción a distancia". Sin embargo, suponía que el espacio libre era un medio que soportaba las fuerzas y deformaciones que permitían la interacción magnética y eléctrica.

Figura 8. M. Faraday y J. C. Maxwell.

El genio culminante de la física del siglo XIX , James Clerk Maxwell (1831-1879), tradujo estas ideas a un lenguaje matemático preciso, y en su monumental tratado aparecido en 1873 publicó las ideas de Faraday, sus propias ecuaciones y todo lo hasta entonces conocido en la materia. Maxwell derivó cuatro ecuaciones que resumen todas las investigaciones hechas por sus predecesores y que han servido como base a todo el desarrollo tecnológico en este campo.

Las soluciones de las ecuaciones de Maxwell mostraron que una onda electromagnética se propaga a la velocidad de la luz. Heinrich Hertz, en 1888, mostró que estas ondas eran precisamente ondas de luz, lo que significó un paso gigantesco al mundo moderno. Esto lo discutiremos en detalle en el próximo capítulo. Ahora sólo queremos

mencionar que una de las influencias impredecibles de estas ecuaciones se hizo patente al crear Einstein la teoría de la relatividad como un intento de dar a las fuentes que producían los campos las propiedades de invariancia que Maxwell había encontrado para los campos magnético y eléctrico.

APARICIÓN DE LOS CONCEPTOS MOLECULARES. TIPOS DE MAGNETISMO

En forma complementaria a los grandes descubrimientos y explicaciones fundamentales delineados en los párrafos anteriores, que tratan sobre todo de la interacción entre imanes y corrientes, el estudio de los imanes y materiales magnetizados se desarrollaba rápidamente. En 1733 y 1755 se observó que el cobalto y el níquel, respectivamente, tenían también propiedades magnéticas. Tanto estos metales como el hierro se quedaban magnetizados aun cuando el campo magnético producido por un imán o corriente se retirase, pero no fue sino hasta 1845 cuando, con el uso de imanes electromagnéticos (el primero fue introducido por Sturgeon en 1825), Faraday demostró sin lugar a dudas que el magnetismo no estaba confinado sólo al hierro. Este utilizó los nuevos imanes para estudiar la relación entre luz y magnetismo, descubriendo el efecto que lleva su nombre. Además, mostró que todas las sustancias son magnéticas en cierto grado, pero que unas, las paramagnéticas, son atraídas por el campo externo y que otras, las diamagnéticas, se colocan paralelas al mismo y son repelidas por un imán. De la misma manera, el hierro y otras sustancias pueden ser consideradas como pertenecientes a otra clase, los ferromagnetos (imanes permanentes). La distinción entre materiales paramagnéticos y diamagnéticos tuvo una extraordinaria importancia teórica. Ampère, con gran clarividencia, sugirió en una carta a Fresnel en 1821 que el origen de las corrientes ferromagnéticas se encontraba en las moléculas que actuaban como pequeños imanes que se orientan cuando se aplica un campo. W. Weber desarrolló esta teoría y elaboró un modelo de corrientes moleculares magnéticas que producen el magnetismo, explicando así el diamagnetismo, el paramagnetismo y el ferromagnetismo. A finales del siglo XIX, Ewing (1890) diseñó algunos experimentos que explicaron satisfactoriamente algunos fenómenos, pero que condujeron a un callejón sin salida que sólo la moderna mecánica cuántica pudo resolver. En efecto, las características fundamentales de los ferromagnetos no se entendieron hasta que en 1929 Dirac y Heisenberg aplicaron los conceptos de la nueva física a tan fascinante problema.

LA TEORÍA DEL ELECTRÓN

La existencia de los electrones, o sea cargas elementales discretas, fue una predicción teórica. Faraday, Maxwell y muchos otros habían ya notado la posibilidad de que la carga estuviera dada en unidades discretas, pero esto no tuvo una repercusión inmediata en la química. La primera sugerencia concreta fue hecha por G. Johnstone Stoney en 1874, que fue quien le dio el nombre al electrón en 1891. De hecho, Stoney se basó en las leyes de la electrólisis de Faraday, a las que interpretó a la luz de la teoría atómica, para llegar a tal conclusión. Fue, sin embargo, el gran físico holandés Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) quien creó la primera teoría del electrón en forma plenamente coherente y consistente. La teoría del electrón fue aplicada primero a fenómenos ópticos. Recordemos, con todo, que había una conexión entre magnetismo y luz ya puesta en evidencia por Faraday. Él mismo había intuido que había una modificación de la frecuencia de la luz (esto es, de su color) en presencia de un campo magnético. Sin embargo, con los medios a su disposición no pudo detectar ningún efecto, y no fue sino hasta 1896 que Zeeman pudo observar este fenómeno.

Algunos de sus resultados se podían explicar mediante la teoría de Lorentz, pero nuevamente la solución final esperaba el arribo de una teoría más completa.

A pesar de ello, la teoría sirvió para explicar los resultados de Pierre Curie (1859-1906) , esposo de la famosa Madame Curie. En 1895, Curie midió la susceptibilidad magnética de varias sustancias, que no es otra cosa que la razón entre la magnetización y el campo aplicado cuando éste es muy pequeño. Curie notó que en los paramagnetos la susceptibilidad dependía del inverso de la temperatura. En 1905 Langevin tomó las ideas de Ampère y Weber y consideró que las corrientes propuestas por ellos eran debidas a electrones circulando en las moléculas. Con estos conceptos pudo explicar la ley de Curie y relacionar el diamagnetismo con el efecto Zeeman. Un avance fundamental tanto en el magnetismo como en su repercusión en la física fue hecho en 1907 cuando P. Weiss introdujo el concepto de campos moleculares intrínsecos y creó de golpe la primera teoría moderna del magnetismo.

El campo intrínseco de Weiss es proporcional a la magnetización, y la generalización que resulta de la teoría de Langevin permite predecir el comportamiento de muchos paramagnetos que no se ajustaban a la ley de Curie, además de permitir que el ferromagnetismo tuviera una explicación molecular. Sin embargo, la teoría de Weiss dejaba abierta la interrogante acerca de qué era realmente el campo intrínseco, el cual por otra parte era

tremendamente grande.

El punto final a lo que podríamos llamar la teoría clásica del magnetismo fue puesto por el gran Niels Bohr (1885-1962) en su tesis doctoral de 1911. Como estos documentos en general permanecen ocultos en los archivos, la física J.H. Van Leeuween sacó a relucir el punto nuevamente, ocho años después de la tesis de Bohr. El así llamado teorema de Bohr-Van Leeuween conduce al siguiente resultado basado en la física clásica: "A cualquier temperatura finita y para todo campo electromagnético aplicado que sea finito, la magnetización neta de un conjunto de electrones es cero." Este sorprendente resultado marca el final de un mundo y el comienzo del reino de la mecánica cuántica y los fenómenos cooperativos.

LA MECÁNICA CUÁNTICA Y EL MAGNETISMO

Aunque la teoría del electrón había sido aplicada al magnetismo con cierto éxito, había ciertas inconsistencias en el tratamiento de varios problemas, tal y como mencionamos anteriormente. En 1900, Planck sugirió su revolucionaria idea de que la materia (que él suponía consistía en resonadores) poseía y emitía energía en forma discreta. Más precisamente, esta energía es un múltiplo entero de una unidad, el *cuanto,* el cual es, a su vez, proporcional a la frecuencia de la radiación emitida o absorbida. La constante de proporcionalidad está dada por la famosísima constante de Planck. En 1905, Einstein propuso que la radiación misma estaba cuantizada independientemente de la materia y que, por lo tanto, la luz se propagaba como una partícula. Una nueva etapa de la mecánica cuántica fue iniciada por Niels Bohr en l9l3 quien propuso que los electrones en el átomo giran alrededor del núcleo sin emitir radiación y que su movimiento está relacionado con la constante de Planck. La transición de un electrón de un estado a otro se acompaña de la emisión o la absorción de radiación cuan tizada. El momento angular es la cantidad física que describe la cantidad de movimiento que realiza una partícula que gira respecto a un punto dado, en este caso respecto al núcleo atómico. Desde el punto de vista del magnetismo, el hecho de que el momento angular esté cuantizado es muy importante, ya que el momento magnético atómico depende del momento angular y, por lo tanto, también está cuantizado.

Esto fue confirmado por O. Stern y W. Gerlach en 1922 al hacer pasar un haz atómico a través de un campo magnético inhomogéneo, el cual se dividió en varios haces. En 1921 Compton propuso que el electrón poseía una rotación intrínseca sobre su eje y un momento magnético propio además del momento angular. En un famoso artículo, en 1925, Uhlenbeck y Goudsmit establecieron definitivamente que el espín del electrón existe y que es igual a la mitad de la constante de Planck.

Los desarrollos antes mencionados están asociados a la llamada mecánica cuántica "antigua", donde no existía una dinámica subyacente que permitiera deducir las características cuánticas de la radiación y la materia. La segunda fase de la mecánica cuántica fue iniciada por De Broglie en 1923, quien sugirió que el fenómeno ondulatorio está asociado con partículas materiales. Así se tiene que la mecánica cuántica atribuye propiedades de onda a las partículas y propiedades de partículas a la radiación (ondas electromagnéticas). En 1926, la nueva mecánica cuántica florece al establecer Heisenberg y Schrödinger sus ecuaciones dinámicas, las que más tarde Dirac generalizó para incluir la relatividad y el espín de las partículas. El efecto de la mecánica cuántica en el magnetismo ha sido impresionante: en primer lugar, ha permitido conectar los fenómenos macroscópicos con las propiedades del átomo y las moléculas, y en segundo, con una influencia aún más directa, ha sido posible explicar las interacciones entre los portadores elementales de momento magnético, tan importantes en ferromagnetismo.

Fue así que en 1927 Heisenberg explicó el ferromagnetismo por medio de lo que se llama "fuerzas de intercambio", fuerzas que son puramente cuánticas y de cuya existencia la física clásica ni siquiera sospechaba. Como una lista de todas las contribuciones de la nueva mecánica para la explicación de diversos fenómenos es imposible en esta introducción, nos conformaremos con mencionar a científicos como Heisenberg, Dirac, VanVleck, Frenkel, Slater, Peierls y otros, quienes ya para 1930 habían desarrollado los fundamentos del magnetismo y habían empezado los cálculos, que continúan hasta la fecha, sobre las propiedades magnéticas de los más diversos materiales. Para esto, el desarrollo del magnetismo como un fenómeno cooperativo ha sido también vital.

EL MAGNETISMO COMO FENÓMENO COOPERATIVO

Al mismo tiempo que los fundamentos del magnetismo basados en la mecánica cuántica se volvían cada vez más firmes, surgían nuevos experimentos que daban resultados misteriosos. Una de las preguntas principales era por qué el hierro no es espontáneamente ferromagnético. Weiss propuso que en un sólido existen dominios en varias

direcciones y que por eso no existe un campo molecular en una dirección dada.

En 1930 tuvo lugar la Sexta Conferencia Solvay sobre magnetismo. Dos años después apareció el libro de Van Vleck y en 1934 el de Stoner. Estos pueden considerarse como los dos libros de mayor influencia en ese campo en aquel tiempo. Sin embargo, el magnetismo como fenómeno cooperativo recibía poca atención y parecía que la teoría de Weiss era la última palabra.

Esto era sorprendente, pues ya en 1925 Ising había propuesto su modelo para explicar el ferromagnetismo: los espines están alineados en intervalos regulares en una dimensión y cada espín puede tomar un valor + o - (Figura 9). Si la interacción es de corto alcance, la temperatura de Curie, a la que la magnetización se hace cero, es también cero.

¿Significaba esto que se necesitan fuerzas de largo alcance para explicar el magnetismo? En 1929 Dirac, tomando una idea de Pauli, propuso que la interacción entre espines electrónicos es el ingrediente esencial en la interacción magnética y que por lo tanto las fuerzas amperianas podían ser despreciadas. En 1930, Bloch y Slater hallaron las llamadas ondas de espín y demostraron que el modelo de Ising fallaba por ser unidimensional y no por su origen cuantístico "a la antigua". En 1932 Neél propuso el antiferromagnetismo para explicar las propiedades del cromo y del magnesio. Para esto, Neél propuso dos redes que compensan sus interacciones. El estudio de múltiples fenómenos prosigue hoy en día con gran fuerza y, sin lugar a dudas, el estudio microscópico del magnetismo puede considerarse como una de las ramas más activas de la física moderna. Profundizaremos en los aspectos microscópicos de esta teoría en un capítulo posterior.

Figura 9. Modelo de Ising.

El que tratemos de introducir al lector, así sea de manera elemental, a tan fascinante tema tiene como propósito fundamental el que se sienta magnetizado, como lo estamos nosotros, por un área tan activa de la ciencia como lo es ésta.

II. EL MAGNETISMO Y LA LUZ (DESCRIPCIÓN MACROSCÓPICA)

INTRODUCCIÓN:

EL ELECTROMAGNETISMO CLÁSICO

EN ESTE capítulo deseamos presentar un panorama a vuelo de pájaro de los aspectos macroscópicos del magnetismo. Los científicos entienden que la forma macroscópica de describir un fenómeno cualquiera es hallar una ley que reúna en un postulado simple una serie de observaciones que el experimentador ha realizado de manera sistemática. Estas observaciones sólo involucran variables macroscópicas o fenomenológicas, que son las que se pueden definir operacionalmente, y sus relaciones. Nótese que en la descripción macroscópica no se hace referencia a ningún modelo o mecanismo microscópico más fundamental. La ley fenomenológica permite predecir nuevos fenómenos que, si son observados experimentalmente, harán que la misma sea validada. Sin embargo, las relaciones entre las variables se obtienen por medio del experimento y no se deducen de la teoría.

El electromagnetismo clásico es un ejemplo claro de teoría macroscópica, y logró su formulación final junto con la termodinámica del siglo XIX. Específicamente, en este capítulo veremos cómo una serie de observaciones realizadas a partir del siglo XVIII condujeron a la formulación de ciertas leyes generales.

Como vimos en el bosquejo histórico, diversos científicos lograron explicar y predecir nuevos fenómenos con estas leyes; así, con el paso del tiempo, y gracias al genio de Faraday y sobre todo al de Maxwell, se logró una síntesis maravillosa que dio pie al nacimiento de la teoría electromagnética. Esta síntesis, a su vez, estimuló la formulación de nuevos experimentos que desembocaron en los experimentos de Hertz y en las maravillosas tecnologías de nuestro siglo. Al mismo tiempo, y desde un punto de vista científico, tres ramas de la ciencia: electricidad, magnetismo y óptica, quedaron reunidas en un esquema conceptual poderoso que llevó al joven Einstein a crear su teoría de la relatividad especial.

El lector curioso se habrá preguntado por qué las leyes macroscópicas tienen determinada forma y no otra. Junto con esta pregunta se plantea otra íntimamente relacionada con ella y que tiene que ver con un punto fundamental. Es verdad que las leyes macroscópicas nos proporcionan las relaciones entre las cantidades físicas. Tal y como lo mencionamos anteriormente, estas cantidades deben ser determinadas experimentalmente o por otro método. La pregunta a que nos referimos está relacionada con cómo se pueden calcular estas cantidades físicas a partir de modelos microscópicos o, como dicen los físicos, "a partir de primeros principios". Nótese que aquí interviene una descripción a nivel atómico o subatómico que debe, al menos ésa es la esperanza, fundamentar las leyes macroscópicas y las relaciones constitutivas (en el sentido de definición) que gobiernan las cantidades físicas que tienen una realidad experimental tangible.

Hechas estas aclaraciones, procederemos a describir las leyes fundamentales del electromagnetismo, así como la síntesis realizada por Maxwell, y de allí pasaremos a describir cómo estas leyes permitieron la explicación del fenómeno luminoso y de otros muchos fenómenos relacionados con él. Para esto haremos hincapié en los conceptos de campo, materia y radiación, ya que éstos forman la base de la descripción de los fenómenos electromagnéticos. Por supuesto, pondremos un énfasis especial en la parte magnética, así como en el estudio de materiales magnetizados.

Un último comentario puede serle útil al lector. Como describimos en el capítulo I, el hombre empezó a notar que ciertos materiales como la magnetita tenían propiedades que ahora llamamos magnéticas. Antes de la revolución científica, el estudio de estos materiales ya había atraído la atención de los científicos. A partir del siglo XIII y culminando en la obra de Faraday y Maxwell, se desarrolló el concepto de campo magnético (y eléctrico) que demostró ser fundamental para el avance del electromagnetismo y condujo a demostrar que la radiación luminosa no era sino una onda electromagnética. Esto permitió atacar un sinnúmero de problemas, lo que llevó a su vez a la explosión que estamos viviendo acerca del estudio de materiales magnetizados y de los diversos tipos de magnetismo que se encuentran en la naturaleza. Finalmente, con la mecánica cuántica se pudo dar una base más fundamental y macroscópica a los conceptos de campo, magnetización, etcétera.

Podrá parecer al principio de nuestra exposición que el concepto de campo tiene poca relación con el magnetismo

en los materiales, pero ésta será una impresión falsa, pues, como veremos más adelante, la formulación de la idea de campo y la comprensión de las leyes de Maxwell, de hecho, facilitan el entendimiento de por qué los materiales magnéticos se comportan como lo hacen.

LOS CAMPOS MAGNÉTICO Y ELÉCTRICO

Las ecuaciones de Maxwell unifican la teoría electromagnética en forma elegante y compacta. En la figura 10 se presenta su forma diferencial, que aparece en notación vectorial. No crea el lector que a continuación procederemos a utilizar tan formidable representación matemática y que los no iniciados perderán el hilo de la materia. Solamente queremos mostrar cómo lucen estas ecuaciones antes de introducir el concepto de campo. Como se ve, en ellas aparecen dos cantidades físicas, **E** y **B,** que son el campo eléctrico y el magnético respectivamente. Esto nos indica que las ecuaciones de Maxwell se ocupan de cómo los campos están relacionados entre sí y nos lleva a caer en la cuenta de que el concepto de campo es esencial para interpretar y describir cualquier fenómeno electromagnético.

$$\mathrm{Div}\ \mathbf{E} = 4\ \pi\ \rho$$

$$\mathrm{Div}\ \mathbf{B} = 0$$

$$\mathrm{Rot}\ \mathbf{E} = -\frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\mathrm{Rot}\ \mathbf{B} = \frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c}\mathbf{J}$$

Figura 10. Ecuaciones de Maxwell en el vacío.

Faraday introdujo el campo eléctrico, el cual describiremos brevemente antes de estudiar el campo magnético. Supongamos que se tiene un arreglo de cargas fijas en el espacio y que estamos interesados en el efecto que éstas tienen sobre otra carga *q* que se lleva a su vecindad. La distribución de carga ejerce una fuerza sobre *q* proporcional a la misma carga *q*. El campo eléctrico **E** asociado a esta distribución de cargas es esta misma fuerza dividida entre *q*. Esto se hace para obtener una cantidad que solamente depende de la distribución de cargas original. Ahora bien, para aclarar más esta definición del campo recordemos que en el siglo XIX el efecto de una carga sobre otra parecía ocurrir instantáneamente; de allí se derivó el concepto de "acción a distancia", esto es, que al tener una configuración de cargas y al mover, digamos, una de ellas, resulta que las otras parecen sentir su acción de inmediato, no importando a qué distancia se encuentre la carga. A Faraday se le ocurrió visualizar el campo en términos de líneas de campo. Éstas son curvas cuya tangente, en cualquier punto, tiene la misma dirección que la fuerza entre las cargas.

Estas curvas son continuas, excepto donde hay cargas o el campo es cero. Mientras más densas sean estas líneas de campo, más fuerte es el mismo. Nótese que el campo eléctrico (y el magnético) son cantidades que poseen magnitud y dirección, o sea que para definirlas necesitamos de estos dos datos. En lenguaje matemático, los campos son vectores. En la figura 11 se muestran algunas líneas de campo cuando interactúan una carga positiva de + 3 unidades y otra negativa de 1 unidad.

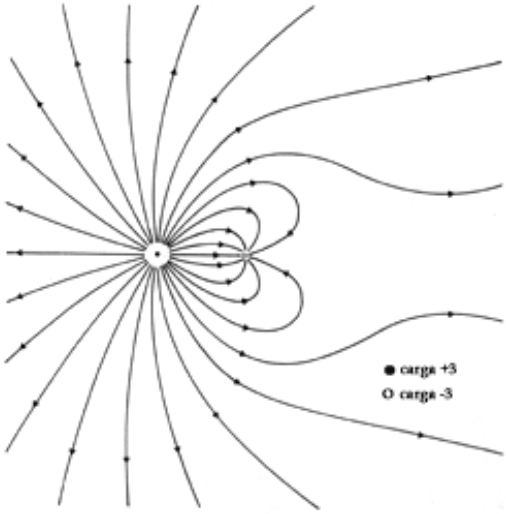


Figura 11. Algunas líneas de campo del campo eléctrico de dos cargas $q_1 = +3$, $q_2 = -1$.

Como se observa, el campo es muy grande cerca de las cargas y las líneas se vuelven menos densas conforme nos alejamos de ellas. Las flechas indican que si ponemos una carga positiva *q* de prueba de una unidad, ésta será atraída por la carga negativa si la ponemos entre las dos cargas y repelida radialmente por la carga positiva si *q* está en el segundo y tercer cuadrante. Si *q* está en el primero y cuarto cuadrante, será repelida de otra manera.

Ahora bien, ¿cómo definimos el campo magnético? Éste es más difícil de definir que el eléctrico por la siguiente razón: tal y como se nota en la segunda ecuación de la figura 10, existe una asimetría entre el campo eléctrico y el magnético debido a que no hay cargas magnéticas aisladas. Esto implica que la situación descrita anteriormente no es aplicable al caso magnético, pues las líneas de campo no pueden salir o llegar a las cargas magnéticas aisladas ya que simplemente no existen.

Si bien podemos colocar dos imanes con sus polos norte y sur y trazar líneas de campo entre ellos, una definición más consistente debe estar ligada al movimiento de una carga. Esto es esencial: el magnetismo, aun cuando empezó a estudiarse desde tiempos remotos, no fue incorporado dentro de un esquema conceptual más vasto ni se empezó a estudiar en forma dinámica hasta el descubrimiento de Oersted en 1820.

De la misma manera en que definimos el campo eléctrico como la fuerza que se ejerce sobre una carga unitaria en reposo, podemos definir otro campo, el magnético, como la parte de la fuerza que involucra la velocidad de la carga y actúa sobre una carga en movimiento. Por lo tanto, la fuerza que actúa sobre una carga tiene una parte estática que sirve para definir el campo eléctrico y una parte dinámica que lo hace para el campo magnético. Esta es la conocida fuerza de Lorentz, llamada así en honor del gran físico holandés de este nombre.

Con el campo definido de esta manera se puede predecir la parte dependiente de la velocidad para la fuerza que actúa sobre cualquier partícula cargada moviéndose a una velocidad dada. El concepto de campo es muy poderoso, pues conociendo el campo eléctrico y el magnético en un punto podemos predecir el movimiento de cualquier carga en este punto.

¿Son reales estos campos? Para científicos como Faraday y Maxwell los campos tenían una realidad física incontrovertible. Sin embargo, esta pregunta que en la actualidad recibe una gran atención no tiene una respuesta fácil. Creamos, pues, en la realidad de los campos, olvidando la "acción a distancia", y usemos esta poderosa representación para penetrar en el misterio de la luz y los materiales magnéticos. El describir los fenómenos electromagnéticos en términos de campos permite que el fundamental concepto de energía pueda ser introducido en forma natural. Los campos son portadores de energía. De hecho, es frecuente mencionar que tanto el campo eléctrico como el magnético almacenan energía. Dada una distribución de cargas o corrientes eléctricas, se tiene una energía potencial asociada a la misma. Más específicamente, dado un campo, la energía potencial asociada al mismo se representa como el cuadrado del campo en cuestión. Al describir la propagación de ondas electromagnéticas veremos que es natural asociar la energía que transportan las ondas con la energía de los campos.

LAS LEYES DE MAXWELL

Las leyes de Maxwell resumen y encuadran dentro de una teoría poderosísima los conocimientos que sobre el comportamiento de los campos, cargas y corrientes en el vacío y en la materia se habían venido acumulando durante muchos años de investigación. Su formulación matemática luce imponente (Figura 10), pero el lector interesado en el magnetismo puede, con un poco de esfuerzo, penetrar en el significado físico que contienen estas leyes.

A continuación describiremos las leyes fundamentales del electromagnetismo y su relación con los fenómenos fundamentales en la materia. Aun cuando este libro se ocupa del magnetismo, describiremos brevemente las leyes que versan sobre las cargas y corrientes eléctricas pues, como hemos visto, las cargas magnéticas libres o monopolos magnéticos no existen y son estas corrientes eléctricas las que generan campos magnéticos en el vacío. Estos campos son de la misma naturaleza que el campo magnético producido por un imán por medio de un mecanismo microscópico, por lo que el estudio de las leyes de Maxwell nos será de mucha utilidad para discusiones posteriores.

Cuatro son las leyes de Maxwell. Éstas, de hecho, fueron descubiertas por científicos anteriores a este gran físico. Sin embargo, éste supo reformularlas, completarlas y obtener de ellas un torrente de información sobre los fenómenos electromagnéticos.

Estas leyes son:

1) Ley de Gauss, que se ocupa del campo y de las cargas eléctricas y es equivalente a la famosa ley de Coulomb;

2) Ley sobre la ausencia de cargas magnéticas libres;

3) Ley de Faraday, sobre la inducción electromagnética, y

4) Ley de Ampère-Maxwell sobre la dependencia del campo magnético de la corriente eléctrica y la variación del campo eléctrico.

Hay que enfatizar que estas leyes fueron descubiertas experimentalmente; con excepción de una parte de la ley de Ampère-Maxwell (la parte de Maxwell). Se puede afirmar que fue Faraday quien, al descubrir la ley que lleva su nombre, introdujo el campo magnético en 1845. Junto con estas leyes existen las llamadas relaciones constitutivas, que relacionan los campos con la magnetización y polarización de la materia. Estas relaciones y la fuerza de Lorentz, descrita anteriormente, completa el gran edificio del electromagnetismo clásico. Pasemos a recorrerlo en detalle para adquirir un conocimiento más completo de su estructura.

LEY DE GAUSS

La ley de Gauss es equivalente a la ley de Coulomb, la cual asevera que la fuerza entre dos cargas es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Dicha fuerza puede ser repulsiva o atractiva, según que las cargas sean de signo igual o contrario respectivamente. Esta ley ha sido comprobada empíricamente en innumerables ocasiones. Como vimos más atrás, el campo eléctrico está relacionado con la fuerza entre una carga de prueba y otra carga, ya que si dividimos esta fuerza entre la carga de prueba obtenemos el campo eléctrico producido por la otra carga. Es notable que la fuerza con la cual interactúan dos cargas no cambia por la presencia de una tercera.

Así pues, el campo eléctrico es producido siempre por una fuente, la cual puede ser una carga o un sistema de cargas. La relación entre el campo eléctrico y sus fuentes puede ser expresada en forma sencilla definiendo el concepto de flujo. En la figura 12 se representa una superficie cerrada de forma arbitraria. El campo representado por las líneas atraviesa esta superficie. Si la dividimos en pequeñas secciones de tal forma que cada pedazo de superficie sea plano y el campo eléctrico no cambie apreciablemente de una sección a la contigua, podemos definir el flujo como el producto del campo eléctrico por el área de la sección que atraviesa. O sea que el flujo nos da una idea de qué tanto campo atraviesa una superficie si usamos todas las secciones que componen esta superficie.

Hasta ahora hemos considerado que la superficie no encierra ninguna carga. Pero ¿qué ocurre si lo hace? Es la ley de Gauss la que nos da la respuesta: el flujo de campo eléctrico a través de cualquier superficie cerrada es

proporcional a la carga total encerrada por esa superficie. Esta es una ley que tiene el mismo contenido físico que la ley de Coulomb, pero expresado en términos del campo y no de la fuerza. Asimismo permite la obtención de expresiones para el campo electrostático dado cualquier arreglo de cargas en reposo. De hecho, el campo eléctrico decrece de la misma forma que el cuadrado de la distancia al alejarse de una carga puntual.

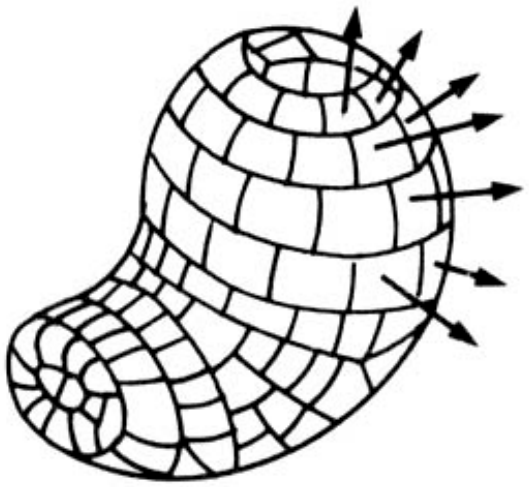


Figura 12. Una superficie cerrada sobre un campo se divide en pequeños elementos de área. Cada elemento se representa por un vector.

Muchas veces, sin embargo, la cantidad que se utiliza para obtener información acerca del campo eléctrico es la diferencia de potencial que aparecerá también al examinar la ley de inducción. El potencial eléctrico es una cantidad escalar, pues sólo se describe con una magnitud, y sirve para medir la cantidad de trabajo por unidad de carga que se realiza al mover una carga positiva de un punto a a un punto b en el campo eléctrico (Figura 13).

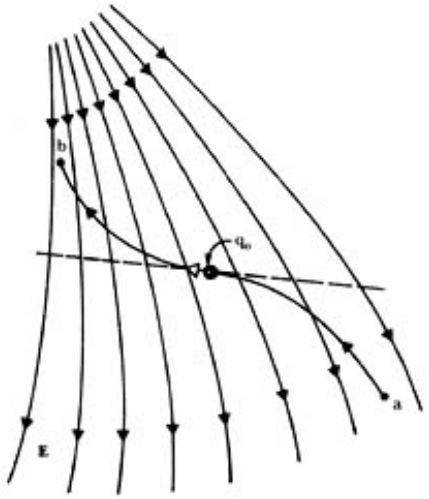


Figura 13. Una carga de prueba q_0 se mueve de *a* a *b* en un campo eléctrico por medio de la acción de una fuerza externa.

La diferencia de potencial entre los dos puntos es independiente de la trayectoria que se tome para ir de *a* a *b* y su variación nos proporciona el campo eléctrico. Para hacer contacto con las manifestaciones cotidianas de la electricidad, diremos que la diferencia de potencial no es otra cosa que el voltaje, al cual nos referimos continuamente. El que haya poco voltaje significa que hay poca diferencia de potencial y que por lo tanto las cargas eléctricas, en este caso electrones, fluyen en forma más errática y que en consecuencia tenemos menos corriente.

LEY DE LA AUSENCIA DE MONOPOLOS MAGNÉTICOS

Nos hemos extendido en la discusión de la ley de Gauss porque los conceptos de flujo y carga son importantes en el estudio de la ley que ahora nos ocupa. En la figura 7 se muestran las líneas de campo magnético y tal pareciera que hay un exceso de carga magnética positiva en un extremo del imán y exceso de carga magnética negativa en el otro. Así, podría pensarse que existe una ley análoga a la de Gauss para el caso magnético. Si tomáramos una superficie que incluya una región del espacio donde haya cargas o polos magnéticos aislados, tendríamos un flujo neto y por lo tanto una ley de Gauss magnética, con lo que se obtendría un campo magnético que decae de la misma forma que el inverso del cuadrado de la distancia a distancias grandes. Es un hecho, sin embargo, que la materia está compuesta de cargas eléctricas libres y no de cargas magnéticas. Dicho de otra forma, los polos magnéticos aislados parecen no existir y por lo tanto la ley para el flujo de campo magnético es diferente de la de Gauss y reza como sigue: el flujo neto de campo magnético a través de cualquier superficie cerrada es cero. Esto es cierto para todo el espacio, pues no existen polos magnéticos aislados.

Sin embargo, en principio no existe impedimento físico para pensar que en algún lugar del espacio (o en el pasado) existieron monopolos magnéticos. A lo largo de este siglo ha habido numerosos intentos para localizar un monopolo magnético. Algunas modernas teorías cosmológicas predicen que pares de polos magnéticos fueron creados al principio del Universo para separarse posteriormente. Estos monopolos serían "pocos" comparados con el número de electrones, por ejemplo, y difíciles de detectar. Esta fascinante búsqueda tal vez tendrá éxito en el futuro.

¿Qué incidencia tendría esto en la ley que ahora tratamos? Aparte de aseverar que el flujo magnético neto en algunos puntos del Universo no es cero, las conclusiones generales de la electrodinámica no se verían afectadas pues, como ya dijimos, la materia está compuesta de cargas eléctricas y las fuentes del campo magnético son las corrientes eléctricas, además de que las interacciones cuánticas son microscópicas.

Para completar diremos que esta ley implica la existencia de una cantidad llamada potencial vectorial magnético, que es de suma importancia en la electrodinámica.

LEY DE INDUCCIÓN DE FARADAY

Entre los físicos que empezaron a investigar la relación entre electricidad y magnetismo, Faraday fue el que realizó las contribuciones más importantes, junto con Ampère. Aquél, entre otras cosas, encontró que una aguja se magnetiza por el pulso de corriente inducida y que puede ser magnetizada en sentido opuesto cuando el circuito primario es desconectado. Esto es consecuencia de la fuerza que un campo magnético ejerce sobre una carga en movimiento. Si imaginamos un circuito moviéndose en un campo magnético producido por una corriente uniforme y suponemos que una carga se mueve en el circuito, podemos definir a la fuerza electromotriz como la cantidad proporcional al trabajo que se hace para mover la carga en cuestión a lo largo del circuito. Si la resistencia del circuito es *R*, la fuerza electromotriz *E* hará circular una corriente 1 en el circuito de acuerdo con la ley de **Ohm *I=E/R*.** Esto indica que la fuerza electromotriz esta íntimamente relacionada con la diferencia de potencial definida en párrafos anteriores. Así, la fuerza electromotriz es proporcional a la variación temporal del flujo de campo magnético que ocurre al desplazarse el circuito (Figura 14).

Puede ocurrir que el circuito se agrande, cambie de forma, etc., dando lugar a que cambie el flujo y por lo tanto se origine una fuerza electromotriz. ¿Qué dirección sigue la corriente en el circuito? Lenz aplicó el principio, basado en la ley de conservación de la energía, de que un sistema físico tiende a oponerse a cambiar del estado en que se encuentra. De esta manera, si sucede que el flujo que pasa por un circuito aumenta con el tiempo, aparecerá un nuevo flujo en dirección opuesta producido por una corriente en el circuito. Como la dirección de la corriente y del campo magnético están relacionadas, se puede obtener la dirección de la corriente conociendo la dirección del flujo.

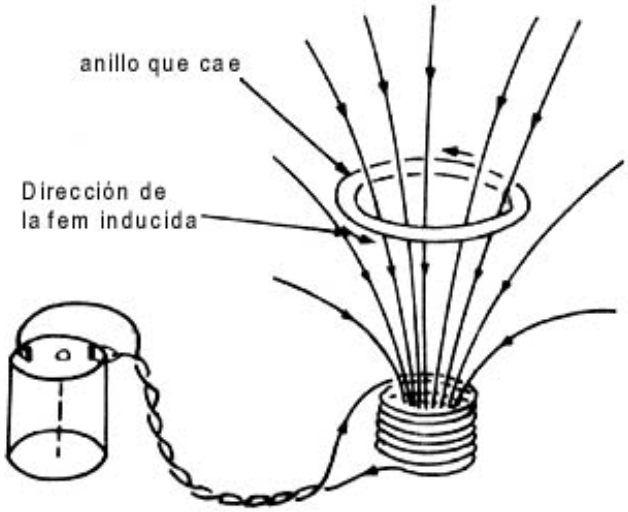


Figura 14. A medida que el anillo cae, el flujo a través del anillo crece. Según la ley de Lenz, la fuerza electromotriz inducida seguirá la dirección de las flechas.

En resumen, al mover un circuito en un campo magnético, la fuerza electromotriz inducida genera una nueva corriente eléctrica en el circuito, que es proporcional al flujo del campo magnético. Faraday demostró que lo mismo ocurre cuando se varía la corriente y el circuito se mantiene en reposo, en lugar de mantener constante la corriente que genera el campo magnético en donde se mueve el circuito. Estas dos situaciones son equivalentes y a partir de ellas podemos enunciar la ley de inducción, en forma general, como sigue: la fuerza electromotriz inducida en un circuito es proporcional a la variación temporal del flujo del campo magnético que rodea al circuito.

Como la fuerza electromotriz se relaciona con el campo eléctrico, la ley establece una relación entre el campo eléctrico en una trayectoria cerrada y la razón de cambio temporal del campo magnético (Figura 14). Esta ley es una relación fundamental que nos muestra cómo se induce un campo eléctrico al variar el campo magnético. Como no existen monopolos magnéticos, no habrá corrientes magnéticas que induzcan un campo eléctrico.

LEY DE AMPÈRE-MAXWELL

El hecho experimental con el que se relaciona esta ley es la producción de campos magnéticos cuando circula una corriente. Como vimos en el capítulo 1, este descubrimiento, debido a Oersted, conmocionó al mundo científico. Ampère descubrió más tarde que si una corriente eléctrica estacionaria circula por un alambre y trazamos una trayectoria cerrada alrededor del alambre, entonces el producto del campo magnético originado por la corriente, por la longitud de esta trayectoria, es proporcional a la corriente. El resultado llevó a Ampère a proponer que el magnetismo en la materia es causado por corrientes de electrones en sus órbitas.

Por cierto tiempo se creyó que sólo la corriente eléctrica generaba un campo magnético. Sin embargo, faltaba un elemento que el genio de Maxwell aportó. Su razonamiento fue el siguiente. Como la carga eléctrica está compuesta de cargas en movimiento y la carga no se crea ni se destruye, la llamada ecuación de continuidad establece que si la carga varía con el tiempo en un punto del espacio, existe una fuente o sumidero de corriente en ese punto. Recordemos que la ley de Ampère es válida para corrientes estacionarias que no varían con el tiempo. Supongamos ahora que tenemos una distribución de cargas que varían con el tiempo. Se debe entonces agregar un término a la ley de Ampère. Este término proviene del hecho de que al variar un campo eléctrico se origina un campo magnético. En ausencia de corriente eléctrica éste deberla ser el único efecto que generara un campo magnético. Notemos que el caso es análogo a lo que sucede en la ley de Faraday y que al agregar este término Maxwell hizo simétricas las ecuaciones (Figura 10). ¿Por qué Faraday no notó este efecto en sus experimentos? Esto se debe a que en cualquier aparato en el cual varía el campo eléctrico, éste lo hace en forma muy lenta. Para hallar el efecto se necesita que el campo cambie rápidamente, tan rápidamente como el tiempo que la luz tarde en cruzar el aparato, o sea tiempos pequeñísimos. Usando microondas, Hertz comprobó la existencia de este efecto predicho por Maxwell.

Por lo tanto, se puede enunciar la ley como sigue: la razón de variación temporal del campo eléctrico más la corriente estacionaria producida por cargas en movimiento es proporcional al campo magnético a lo largo de una

trayectoria cerrada.

Así, hemos presentado las cuatro leyes fundamentales del electromagnetismo. A continuación examinaremos cómo fueron usadas por Maxwell para predecir que la luz es una onda electromagnética que se desplaza en el vacío.

LA LUZ ES RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

¿Cómo es que Maxwell predijo a partir de sus ecuaciones que la luz es una onda electromagnética, es decir que consiste en campos eléctricos y magnéticos propagándose en ángulos rectos uno con respecto al otro? Antes de responder a la pregunta anterior, aclaremos que por luz entendemos en esta sección todo el espectro de radiaciones electromagnéticas. Una onda se propaga con cierta velocidad y frecuencia y las características de la misma varían con ésta. Las ondas de muy baja frecuencia o longitud de onda larga son ondas de radio. Al aumentar la frecuencia tendremos las conocidas microondas, después la radiación infrarroja, hasta llegar a un pequeño intervalo de 1014 ciclos/seg donde encontraremos la luz visible, del rojo al azul. Sigue después la radiación ultravioleta y a altas frecuencias los rayos X. Pues bien, en este espectro de radiación tenemos ondas electromagnéticas que se transmiten a una velocidad constante y con frecuencia distinta. A mayor frecuencia, mayor es la energía transportada.

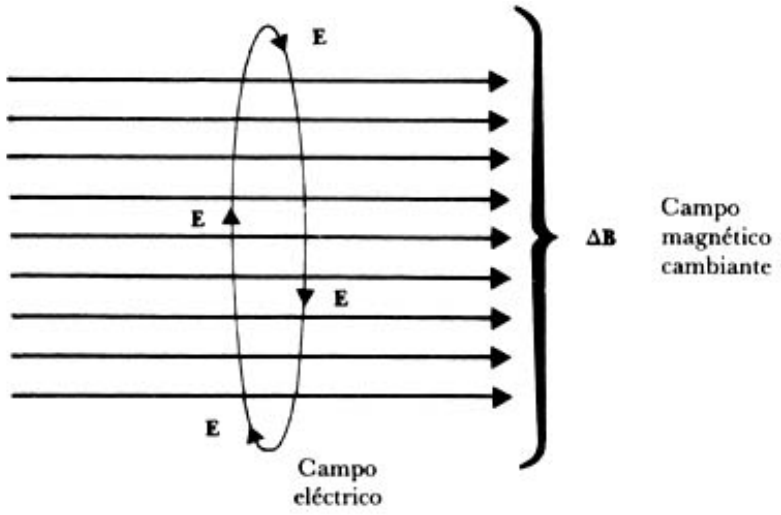


Figura 15. Un campo magnético que cambia uniformemente (DB) produce un campo elécrtico estacionario en un aro de alambre. Si el campo magnético cambia en forma no uniforme, produce un campo eléctrico cambiante en el aro de alambre.

La predicción de Maxwell se basa en dos pilares: el descubrimiento de que existe un campo magnético asociado a cargas en movimiento estacionario, además de que (y ésta fue su gran aportación) una variación del campo eléctrico induce también un campo magnético, y el descubrimiento de Faraday de que un campo magnético variante induce una corriente. Si el lector escudriña la figura 10, haciendo cero la carga *p* y la corriente **J** debida a las cargas en movimiento, verá que las dos últimas ecuaciones son simétricas y que ante una sustitución de **E** por -**B** serán completamente invariantes.

Maxwell interpretó y conectó estas dos leyes imaginando un circuito en el espacio, tal como se muestra en la figura 15.

Supongamos que existe un campo magnético no uniforme que varía con el tiempo. La ley de Faraday nos indica que este campo inducirá una fuerza electromotriz que a su vez producirá una corriente que representa un campo eléctrico no uniforme variando en el tiempo. Este campo a su vez produce un campo magnético no uniforme que se desplazará en el espacio. Para evitar complicaciones con la forma y tamaño del circuito, hagámoslo infinitamente pequeño. De esta forma y en lenguaje campista ocurre que en algún punto del espacio un campo magnético variante inducirá un campo eléctrico variante (aun sin circuito), el cual a su vez inducirá un campo eléctrico en otro punto del tiempo y del espacio y así sucesivamente. De esta manera se genera una onda electromagnética donde los campos aquí y ahora dependen de cómo eran los campos en el pasado y de la posición inmediatamente anterior.

Maxwell, a continuación, propuso la hipótesis de que estas ondas eran ondas transversales. Al generarse uno al otro, el campo magnético y el eléctrico lo hacen a ángulos rectos, y de tal forma que la onda de luz se propaga también en ángulos rectos respecto a los dos campos (Figura 16).

Además, probó que la velocidad de transmisión de las ondas electromagnéticas era 3 X 10^5 km/seg en el vacío.

Lo que hemos descrito brevemente, sin duda representa uno de los logros culminantes de la física en todos los tiempos. Cuando los resultados fueron publicados en 1873, pocos científicos captaron todas las consecuencias que se derivaban de esta teoría.

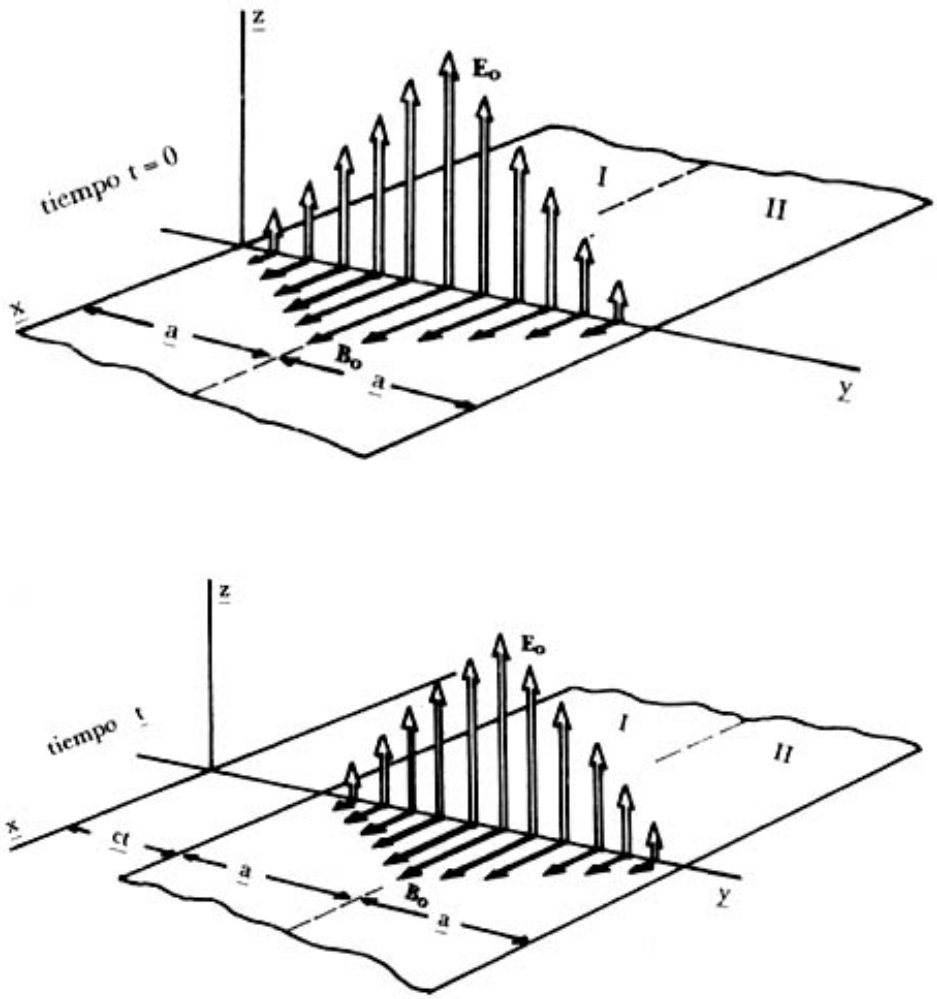


Figura 16. Configuración de campos eléctrico y magnético que viajan con velocidad *c* en la dirección *y*.

La teoría tuvo que aguardar alrededor de 15 años para su confirmación experimental por Hertz, quien, para diseñar su experimento, utilizó el hecho, enfatizado por Maxwell, de que para producir una onda electromagnética se tiene que excitar una carga para ponerla en movimiento y así generar la radiación. Hertz dispuso de un generador que producía ondas con frecuencia de 10^8 ciclos/seg, o sea microondas, y no produjo luz visible.

Queremos por último enfatizar que las ondas electromagnéticas pueden superponerse, ya que por fortuna las ecuaciones de la electrodinámica son lineales en los campos. Si dos conjuntos de campos satisfacen las ecuaciones, su suma también lo hace, y así cualquier superposición de ondas electromagnéticas planas tiene las características generales de las ondas originales; a saber:

1) viajan a la velocidad de la luz, sin cambiar forma, cualquiera que ésta sea;

2) el campo magnético y eléctrico son perpendiculares uno al otro y a la dirección de propagación de la onda, y

3) en cualquier tiempo y lugar la magnitud del campo eléctrico es igual a la del magnético.

CAMPO MAGNÉTICO Y MATERIA

Hasta ahora hemos descrito a los campos en el vacío y no hemos hecho mención de su comportamiento cuando interactúan con la materia. Comentábamos más atrás que el estudio del concepto de campo había incidido enormemente en el estudio de los materiales magnéticos, ya que podía englobar dentro de un esquema conceptual único una gran cantidad de fenómenos. En esta sección nos limitaremos a estudiar campos magnéticos interactuando con la materia, mencionando sólo de pasada algunos elementos sobre los campos eléctricos. Es de hacer notar que no describiremos cómo la electrodinámica se une a la termodinámica para entender los cambios de energía que ocurren al efectuar un proceso físico en materiales magnéticos, puesto que eso sería el tema de un libro aparte. Para iniciar nuestra discusión, supongamos que tenemos una bobina que produce campos magnéticos muy fuertes. ¿Qué ocurre si sometemos diversas sustancias al efecto de este campo? Sabemos que las partículas de estos materiales sufren una fuerza proporcional a la masa de la muestra. Sin embargo, otros resultados no muestran un comportamiento sistemático: unas sustancias son jaladas hacia la dirección en donde el campo es mayor, otras hacia donde disminuye, otras más apenas parecen sentir el intenso campo magnético al cual están sometidas, etc. Por ejemplo, el oxígeno líquido puede sentir una gran fuerza, mientras que el nitrógeno apenas si se entera de que hay un campo. Esto nos indica la gran variedad de materiales magnéticos que existen y el intervalo tan grande en que la fuerza magnética ejerce su acción. Obviamente el hierro parece ser "más magnético" que otras sustancias (v.g., cinco órdenes de magnitud respecto al cobre). Además, para algunas sustancias la fuerza que actúa sobre ellas varía de la misma forma que el cuadrado del campo, mientras que para los óxidos de hierro o el hierro mismo varía lentamente. Es conveniente clasificar a las sustancias de acuerdo a su comportamiento para poder aplicar las leyes estudiadas en las secciones anteriores, debidamente modificadas, para tomar en cuenta que hay materia. Así, las sustancias que son repelidas por los imanes son llamadas diamagnéticas, por ejemplo el agua y los compuestos orgánicos. De hecho, todas las sustancias son diamagnéticas, pero en algunas de ellas otros efectos son más importantes.

Las sustancias atraídas hacia campos más fuertes son llamadas paramagnéticas. En algunos metales el paramagnetismo es débil y en otros fuerte. Además, a bajas temperaturas el paramagnetismo aumenta, tal como sucede con el oxígeno líquido.

Finalmente, las sustancias que se comportan como el hierro y la magnetita son llamadas ferromagnéticas.

¿Cómo podemos descubrir este comportamiento de la materia sin recurrir a un modelo microscópico? ¿Pueden adaptarse las leyes macroscópicas para entender estos tipos de magnetismo? Para empezar, hay que tener presente que en su interacción con la materia el campo magnético juega un papel radicalmente distinto al campo eléctrico, pues la materia está hecha de cargas eléctricas y corrientes eléctricas y no existen cargas o corrientes magnéticas. De allí que esperemos que las fuerzas eléctricas dominen el comportamiento de la materia.

Dejaremos para el siguiente capítulo la descripción de modelos microscópicos para explicar el magnetismo. Sólo recordaremos que las explicaciones dadas por Ampère y otros físicos del siglo XIX y principios del siglo XX consideraban que el magnetismo era causado por las corrientes atómicas que al crear campos macroscópicos determinaban las características magnéticas de la materia.

Para caracterizar macroscópicamente las diversas sustancias es conveniente introducir. el concepto de momento magnético. Este se define como la cantidad proporcional al producto de la corriente que se mueve en un circuito por el área encerrada por el mismo. Si aplicamos un campo magnético externo veremos que la fuerza sobre este dipolo es proporcional al campo magnético, y el resultado experimental es que las sustancias paramagnéticas y diamagnéticas adquieren un momento magnético proporcional al campo. Esta relación es lineal y podemos definir a la susceptibilidad magnética X como la razón entre el momento magnético y el campo. Para sustancias diamagnéticas la susceptibilidad es pequeña y menor que cero, del orden de $\mathbf{-1 \times 10^6}$. Para materiales paramagnéticos Ξ es positiva y un poco mayor. Por lo tanto, podemos afirmar que en estas sustancias el campo aplicado que actúa sobre los dipolos magnéticos es el mismo que en el vacío. Sin embargo, en otro sistema el campo producido por los momentos magnéticos es grande, por lo que deberíamos tomar en cuenta estos campos y adicionarlos al campo aplicado. Aquí es conveniente hacer notar que las corrientes pueden clasificarse como corrientes libres y ligadas. Las primeras corresponden a corrientes macróscópicas, mientras que las segundas

están asociadas a corrientes moleculares, es decir a la fuente de la magnetización del material. Las corrientes libres están asociadas a un nuevo campo magnético **H,** distinto de nuestro conocido campo magnético **B,** mientras que este último está asociado a la corriente total. De paso mencionaremos que nuestro conocido campo eléctrico **E** está asociado a la carga total. La diferencia entre **H,** llamado desplazamiento magnético, y el campo **B,** es obviamente proporcional a la magnetización del material, y su razón es la llamada permeabilidad magnética. De hecho, para estudiar los campos originados por corrientes libres debería usarse el desplazamiento magnético. Sin embargo, consideramos que el campo magnético fundamental es **B,** ya que no existen cargas magnéticas libres.

Habiendo examinado someramente la susceptibilidad magnética para sustancias diamagnéticas y paramagnéticas, pasemos a estudiarla cuando el material es ferromagnético. El lector se habrá dado cuenta que el ferromagnetismo es el fenómeno que atrajo la atención del hombre hacia la magnetita, puesto que es magnetismo "permanente". La fuerza sobre una sustancia paramagnética es proporcional a la variación del campo, lo que sugiere que, si el campo es muy fuerte, el momento magnético de un ferromagneto alcanza un límite. Aun sin campo externo los ferromagnetos conservan su magnetización, pero la pierden al elevarse la temperatura.

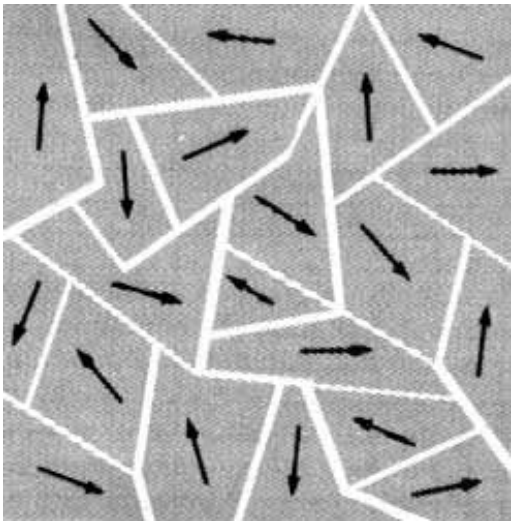


Figura 17. Se muestran los dominios magnéticos en un material ferromagnético orientados al azar. Sin embargo, en cada uno de ellos todos los dipolos magnéticos se alínean en una dirección dada por las flechas.

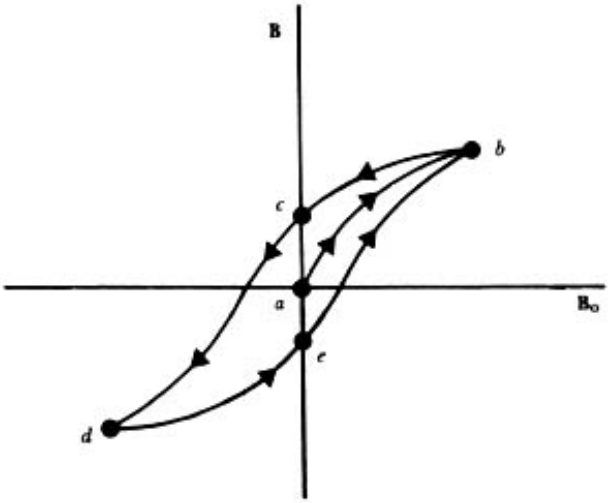


Figura 18. Curva de magnetización *(ab)* y su curva asociada de histéresis *(ebcde)* para una muestra de hierro.

Su magnetización es mucho mayor que la de los materiales paramagnéticos. Todo esto sugiere que los dipolos magnéticos deben estar "amarrados" en una dirección por "algo" de naturaleza distinta a los mecanismos discutidos hasta ahora.

Por ejemplo, el hecho de que a determinada temperatura se destruya el ferromagnetismo indica que los momentos magnéticos no están alineados. Por supuesto que los materiales están compuestos de los llamados dominios magnéticos que serán estudiados en el siguiente capítulo, en donde millones de momentos están alineados en una dirección (Figura 17). Si hay más dominios con un momento magnético promedio en una dirección determinada, el material estará magnetizado.

¿Cuál es la relación entre la magnetización y el campo en un ferromagneto? Supongamos que tomamos hierro demagnetizado y aplicamos un campo externo, el cual hace variar **B** que, recordemos, está relacionado con la corriente total.

En la figura 18 podemos ver que al incrementar el campo externo los dominios se alinean fácilmente, pero que después se necesita un campo mayor para conseguir una pequeña variación de las corrientes ligadas. Si ahora disminuimos el campo externo, veremos que la curva no retorna al punto de partida por el camino que seguía al aumentar el campo.

Éste es el fenómeno de histéresis que se debe a la irreversibilidad del proceso y que es indispensable para obtener una magnetización permanente. Con esto concluimos este capítulo, para pasar en el siguiente a examinar los fundamentos microscópicos del magnetismo.

III. EL MAGNETISMO Y EL ÁTOMO: DESCRIPCIÓN MICROSCÓPICA

INTRODUCCIÓN:

ESTRUCTURA ATÓMICA DE LA MATERIA

EL CAPÍTULO anterior muestra los avances en la descripción de la teoría electromagnética que fueron y son de gran utilidad, pero no resuelven el misterio del origen microscópico de los fenómenos electromagnéticos, los cuales son, se podría decir, la última causa de los efectos que vemos. Expondremos aquí una teoría de las propiedades eléctricas y magnéticas de la materia fundamentada en la física atómica moderna y la mecánica cuántica.

Hubo un famoso intento de reformular la teoría electromagnética como una teoría microscópica partiendo de nuestro conocimiento de la existencia del electrón debida a Lorentz, llamada teoría del electrón. Como mencionamos al principio del libro, el modelo de Lorentz se topó con la necesidad de una teoría más completa. El electrón no es una partícula clásica y por tanto obedece las leyes de la física cuántica.

Actualmente sabemos que la materia está formada por átomos. Estos tienen su estructura propia, pero para nuestros propósitos bastará con que los consideremos como núcleos cargados positivamente, alrededor de los cuales giran electrones cargados negativamente, de tal manera que los átomos como un todo son neutros en su estado natural. Los electrones al girar en sus órbitas producen un campo magnético semejante al de un imán, como sabemos por la teoría electromagnética. Así, desde el punto de vista de sus propiedades magnéticas, los materiales están formados por pequeños imanes que, si el material no manifiesta magnetización, necesariamente están orientados al azar. Cuando se somete un material a la acción de un campo magnético, pueden darse dos mecanismos.

En el primero los imanes simplemente se alinean en la dirección del campo aplicado, como las brújulas en la Tierra. Este efecto se llama paramagnetismo y este alineamiento produce una resultante en la misma dirección del campo, dando como resultado que el material se comporte como un imán que es atraído en el sentido de ese campo. En el segundo mecanismo, llamado diamagnetismo, el material también se comporta como un imán, pero que se opone al campo que lo produce, siendo repelido por éste. Aquí el campo externo obliga a los imanes atómicos a precesar en la dirección del campo, generando un momento magnético. También podemos ahora entender el efecto de la temperatura en los fenómenos magnéticos, ya que los átomos están también sujetos a movimientos térmicos que se oponen a que se alineen en una cierta dirección.

Entender el ferromagnetismo es más difícil. Estos materiales presentan porciones que tienen magnetización completa y permanente y se llaman dominios ferromagnéticos. Fue Pierre Weiss en 1907 quien se dio cuenta de que los materiales ferromagnéticos están formados por estos dominios, los cuales pueden inclusive orientarse de tal manera que el material no exhiba propiedades magnéticas (Figura 19).

Con un campo magnético externo los dominios se pueden reorientar o crecer hasta formar un imán. Como ya lo hemos mencionado, este proceso de magnetización es irreversible. Para explicar la existencia de los dominios también se puede pensar en términos de pequeños imanes, pero que están formados por los propios electrones, los cuales poseen un movimiento magnético intrínseco llamado espín. La acción conjunta de los espines dentro de un dominio obedece a la fuerza de intercambio que es de naturaleza cuántica y no tiene análogo en la física clásica.

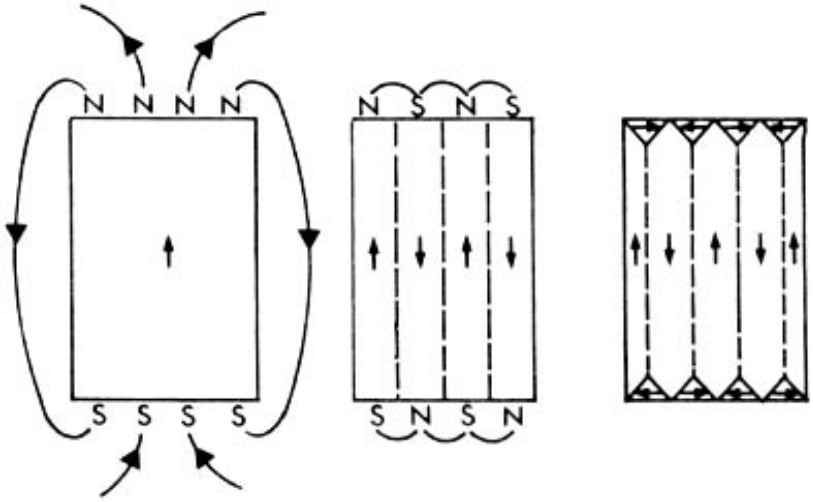


Figura 19. Los dominios magnéticos pueden formar diferentes patrones, para minimizar la energía. Se pueden observar experimentalmente por ejemplo con un microscopio electrónico. Los dominios magnéticos se pueden mover por medio de campos externos.

El hecho de que el electrón se comporte como un pequeño imán nos lleva a suponer que todas las partículas elementales cargadas podrían tener momento magnético. De hecho así es y la teoría de las partículas elementales incluye el estudio de sus momentos magnéticos. Pero cuidado, la teoría electromagnética es una teoría macroscópica, basada en experimentos en la escala de nuestras proporciones y el reino de las partículas elementales puede deparar muchas sorpresas.

SUSTANCIAS MAGNÉTICAS

Como mencionamos en el capítulo 1, las propiedades térmicas de las sustancias magnéticas fueron estudiadas por Pierre Curie, quien estableció que la susceptibilidad magnética de las sustancias paramagnéticas depende del inverso de la temperatura. En todos los ferromagnetos encontró un descenso de la magnetización hasta que la temperatura llegaba a un valor crítico, llamada temperatura de Curie (Tc), donde la magnetización se hace igual a cero (Figura 20); arriba de la temperatura de Curie, los ferromagnetos se comportan como sustancias paramagnéticas. También existen otros ordenamientos magnéticos (antiferrimagnético y ferrimagnético) cuyos modelos microscópicos serán discutidos en el siguiente capítulo.

El diamagnetismo lo explicó Paul Langevin una década después de los experimentos de Curie. El fenómeno se puede explicar usando las leyes de Maxwell. Cuando se enciende un campo magnético, aparece un campo eléctrico. Éste acelera a un electrón, produciéndose así una corriente, la cual crea una magnetización contraria al campo aplicado, según la ley de Lenz.

Esta explicación implica suponer que la ley de Lenz se cumple a escala atómica. Ya Coulomb sabía que las leyes ordinarias de electrostática y magnetoestática no podían ser válidas en la escala atómica. Con esa misma filosofía, Pierre Weiss supuso que las interacciones entre las moléculas magnéticas se podrían descubrir empíricamente, por lo que introdujo el campo molecular sin intentar describir las leyes microscópicas. Este campo molecular actuaría sobre cada molécula como un campo externo y sería proporcional a la magnetización y al tipo de material. Su modelo llevó a la ley Curie-Weiss, que obedecen practicamente todos los ferromagnetos. Esta coincidencia tan perfecta hizo difícil hacerle mejoras.

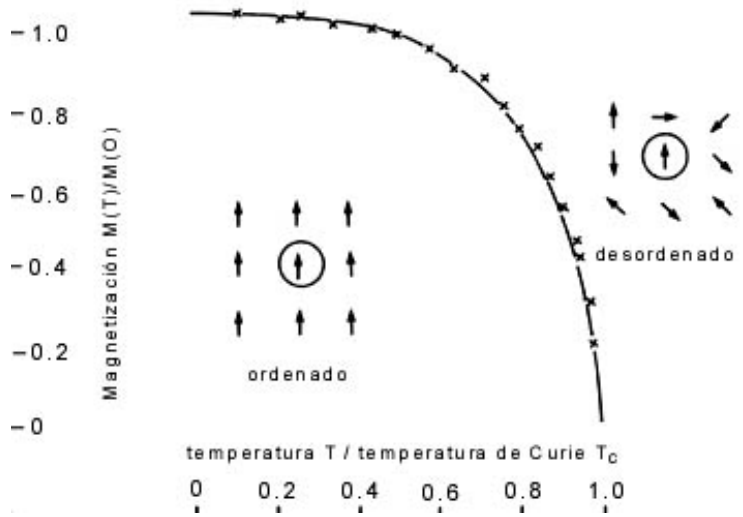


Figura 20. El campo molecular de Weiss. Un espín escogido (en círculo) en un material magnético experimenta un campo debido a los otros espines. La magnetización se hace cero en temperatura de Curie Tc .

Existía en esa época un enigma experimental: ¿por qué no es el hierro espontáneamente ferromagnético? Weiss propuso que su campo molecular tenía diferentes direcciones en algunos pedazos del sólido. Esto fue probado por Barkhausen en 1919, quien por medio de amplificadores electrónicos oyó los "clics" cuando un campo externo obliga a los dominios de Weiss a alinearse. Este es un comportamiento irreversible que explica el fenómeno de histéresis. Medidas de la razón giromagnética en ferromagnetos probaron además que éste no es magnetismo atómico o molecular, sino que sólo el espín electrónico participa de él.

Así pues, a pesar de la belleza de los argumentos de Lorentz y Langevin para aplicar la teoría electromagnética a nivel microscópico, resultó inevitable reconocer que a escala atómica había algo nuevo y diferente y que hacía falta una nueva teoría para enfrentarse a este mundo. De hecho, con el teorema de Bohr-Van Leeuwen quedó claro que la mecánica estadística clásica de las partículas cargadas no es capaz de explicar el comportamiento de ninguna de las sustancias magnéticas descritas aquí.

TEORÍA CUÁNTICA

De 1913 a 1925 se desarrolló la "vieja mecánica cuántica". Bohr cuantizó el átomo de Rutherford y se empezó a entender bien la estructura de la materia. En 1921, Compton propuso que el electrón posee un espín intrínseco (gira sobre sí mismo) y momento magnético, además de su momento angular orbital y su magnetización.

Esto fue probado en 1925 por S. Goudsmit y G. E. Uhlenbeck, quienes demostraron que el espín del electrón es $\hbar$ / 2 (con $\hbar = \frac{h}{2\pi}$, h la constante de Planck) y al momento magnético le asignaran el doble del esperado para una partícula cargada girando. En 1896 Zeeman mostró que las líneas espectrales se podían descomponer en conjuntos, llamados multipletes, si los átomos emisores se sujetan a campos magnéticos intensos. La teoría del electrón de Lorentz dio una explicación razonable de este efecto. Sin embargo, el efecto Zeeman anómalo ya no pudo ser explicado de la misma manera. En él se observó que las líneas *D* del sodio, en presencia de un campo magnético fuerte, se partían en cuartetos y multipletes mayores. Landé, al estudiar el efecto Zeeman anómalo, introdujo el famoso factor *g* y Goudsmit y Uhlenbeck le asignaron un factor de g = 2 al espín del electrón para que concordaran los resultados. Este factor de dos sólo se entendió bien algunos años más tarde cuando Dirac unió la teoría de la relatividad con la mecánica cuántica.

La mecánica cuántica se desarrolló muy rápidamente. En 1923 De Broglie introdujo la mecánica ondulatoria: el electrón no es simplemente una partícula, sino que también tiene características de onda. En 1926 aparece la ecuación de onda debida principalmente a E. Schröedinger y equivalente a la ecuación de movimiento de la mecánica clásica de Newton. Mientras tanto, W. Heisenberg y H. A. Kramers probaron que se podría escribir esta mecánica en forma matricial y Max Born y Norbert Wiener colaboraron en demostrar que a cada cantidad física le corresponde un operador. La conexión entre teoría cuántica y mecánica estadística surge desde la cuantización de

la radiación hecha por Planck en 1900.

La mecánica cuántica incluye el llamado principio de incertidumbre de Heisenberg que limita nuestro poder de información. Cuando estamos en el mundo microscópico, donde la constante de Planck se vuelve importante, no podemos conocer exactamente la posición y la velocidad de una partícula en forma simultánea. Precisar una implica perder precisión en la otra. En 1927 Pauli inventó las matrices de espín y su principio de exclusión, el cual volveremos a mencionar en un momento.

Simultáneamente al desarrollo de la mecánica cuántica, Hartree, Fock, Heiter, London, Slater y muchos otros hacían cálculos atómicos y moleculares como una de las aplicaciones de la nueva ciencia. Para 1930, fecha del famoso y ya mencionado congreso de Solvay sobre magnetismo, ya se habían sentado las bases de la teoría moderna de la materia y sus propiedades.

EL ESPÍN

En 1921 Arthur Compton, un joven físico estadounidense quien trabajaba con Rutherford en Cambridge, tuvo la idea de que el electrón debería poseer un momento angular intrínseco o espín y por lo tanto actuar como un imán.

Este espín no se debe confundir con el momento magnético que se produce al orbitar un electrón alrededor de un núcleo, el cual, además, era conocido. Compton tenía una base para proponer el espín, pues diversos experimentos no podían ser explicados de manera satisfactoria. Uno de ellos, el llamado experimento de Einstein-de Hass (1915) mostró que el factor de Landé o razón giromagnética valía 2 en vez de 1 como la teoría predecía. Esta razón giromagnética mide la razón entre el momento magnético y la componente del momento angular en una dirección. Para medirlo, se suspende una barra magnética de una fibra de cuarzo y se magnetiza pasando corriente por un alambre enredado en ella. De esta forma la barra adquiere un momento magnético y un momento angular que se determina por medio de la rotación angular de la fibra de cuarzo. La magnetización se debe por entero al movimiento de los electrones, pues la razón es negativa.

Además de este experimento, existían otros, tales como el efecto Zeeman anómalo, que estaban en desacuerdo con la teoría en boga. En 1925, Wolfgang Pauli investigó el problema de por qué las líneas del espectro de los metales alcalinos no eran singuletes como lo predecía la teoría de Bohr sino un doblete, o sea, había dos líneas en vez de una. Esto podía ser explicado si se suponía que el electrón podía existir en dos estados. Sin embargo, el experimento crucial que mostró la existencia del espín fue realizado por Otto Stern y Walter Gerlach en 1921. En su clásico experimento, un haz de átomos monovalentes, como el hidrógeno, el litio o la plata, viajaban a lo largo de un eje atravesando un campo magnético perpendicular a dicho eje. Había gradientes muy grandes, ya que el campo era inhómogéneo. En sus experimentos, Stern y Gerlach estudiaron la división del haz de átomos en el estado base y en estados excitados. Se esperaba que en el estado base no hubiera división, pero se encontró que el haz se dividía en dos componentes. El análisis mostró que este efecto podía ser consecuencia del electrón en la parte más externa del átomo. La proyección del momento magnético del estado base podía tomar, pues, dos valores. Esto condujo a G. Uhlenbeck y S. Goudsmit a introducir la hipótesis que un electrón posee un momento angular intrínseco en adición a su momento angular orbital. Uhlenbeck y Goudsmit, quienes por cierto *no* recibieron el premio Nobel, mostraron que los multipletes espectrales podían ser explicados con esta hipótesis, introduciendo el espín *s* que podía tomar dos valores, $+\frac{1}{2}$ ó $-\frac{1}{2}$, de tal forma que el momento angular intrínseco del electrón era $+\frac{\hbar}{2}$ ó $-\frac{\hbar}{2}$. Además, se podía explicar el valor de dos para el factor de Landé en el experimento de Einstein-de Hass.

El concepto de espín electrónico apareció al principio como una hipótesis extra que debía ser agregada al resto de la teoría cuántica. Se pensaba que el espín podía ser tratado en forma análoga a un trompo girando sobre su eje. Debe enfatizarse, sin embargo, que no existe una teoría clásica rigurosa del espín.

La culminación de estos estudios fue la formulación por Dirac de su famosa ecuación dinámica, la cual incluye el espín electrónico y la relatividad especial. En su teoría, las propiedades del espín se obtienen en forma natural de la misma y no se necesitan hipótesis adicionales.

No se puede subestimar la influencia del espín en la física moderna. Puede afirmarse que éste es uno de los conceptos centrales de esta ciencia, y tanto en la física cuántica como en los fenómenos cooperativos ha jugado un papel fundamental para entender una gran diversidad de fenómenos.

INTERCAMBIO

Retomemos el problema del ferromagnetismo, pero esta vez como un fenómeno colectivo. ¿Qué entendemos por un fenómeno colectivo? Supongamos que caminamos en una calle bastante transitada y que a dos cuadras adelante de nosotros ocurre un accidente. De inmediato esa información se transmite por medio de la gente en forma de un movimiento colectivo y por tanto nos enteramos de qué pasó bastante antes de verlo. Es claro que un fenómeno así involucra a muchas personas. Esto es lo que en física se llama un fenómeno de muchos cuerpos. Cabe adelantar que el estudio del magnetismo como un fenómeno cooperativo desempeñó un papel decisivo en la mecánica estadística cuántica y en la termodinámica de las transiciones de fase. Hoy, con la teoría del grupo de renormalización, el estudio de las transiciones de fase es uno de los campos más importantes en el estudio de la materia.

El problema para poder explicar el ferromagnetismo consiste en lo siguiente: ya sea que los pequeños imanes que forman la materia sean electrones en sus órbitas o espines de electrones, las fuerzas magnéticas entre ellos no son lo suficientemente intensas para producir un ferromagneto. La interacción magnética se puede despreciar comparándola a la fuerza electrostática entre electrones. Con una simultaneidad que se ha repetido muchas veces en la historia de la ciencia, Dirac y Heisenberg descubrieron la fuerza de intercambio. Este efecto es bastante misterioso, ya que es totalmente cuántico y no tiene análogo clásico; ¡el ferromagnetismo no existiría si la constante de Planck *h* fuera cero!

Cuando Pauli introdujo su notación matricial para el espín, quedó claro que el espín es una cantidad vectorial. Esto implica que podemos imaginárnoslo como una flechita. ¿Qué puede suceder si tenemos dos electrones cada uno con su flecha de espín asociados y alineados ambos en alguna dirección? Pues que los espines podían quedar paralelos o antiparalelos, lo que se ve claramente en la figura 21.

Figura 21. Las flechas representan espines paralelos y antiparalelos.

Cada electrón dentro de un átomo está caracterizado por un conjunto de números cuánticos que nos dicen sus propiedades físicas. El principio de exclusión de Pauli establece que no puede haber dos electrones en un átomo con el mismo conjunto de números cuánticos. Esto implica que en una misma órbita sólo puede haber dos electrones, ya que la órbita da una serie de características comunes y sólo queda la posibilidad de que los espines sean antiparalelos. Este principio de exclusión lo cumplen todas las partículas que tienen espín fraccionario, como es el caso del electrón.

Tenemos entonces que, por un lado, los electrones sufren una repulsión electrostática (ley de Coulomb) y, por otro, que tienen que cumplir el principio de exclusión. Por dicho principio los espines paralelos tienden a separarse y eso reduce su repulsión. Se llama "intercambio" a la diferencia de energía entre la configuración de espines paralelos y la configuración de espines antiparalelos. Esta energía de intercambio favorece al ferromagnetismo solamente si el aumento de energía cinética causado por la separación es mayor que el descenso en la energía potencial electrostática. Los detalles de esta interacción son complicados, pero lo importante es apreciar que las fuerzas involucradas son eléctricas y que son mucho más intensas que las magnéticas, entendiéndose así el llamado magnetismo fuerte.

Con este modelo, cuando la temperatura está abajo de la temperatura crítica, se producen las llamadas "ondas de espín" (Figura 22). Se forma una onda magnética en el material, en la cual participan todos los espines o pequeños imanes. Como se observa es claramente un efecto cooperativo. Arriba de la temperatura crítica las vibraciones térmicas son demasiado importantes y desaparecen las ondas de espín. Además las ondas de espín están cuantizadas y esos cuantos se llaman magnones. Pero aquí vamos a dejar ya la historia microscópica del magnetismo.

A pesar de que se ha investigado mucho sobre el intercambio no se ha logrado enunciar un postulado universal de primeros principios, como lo son las leyes de Maxwell o las de Newton en la mecánica clásica, De hecho, se tienen sólo descripciones semicuantitativas que aunque exitosas en algunos aspectos, pueden todavía ser mejoradas.

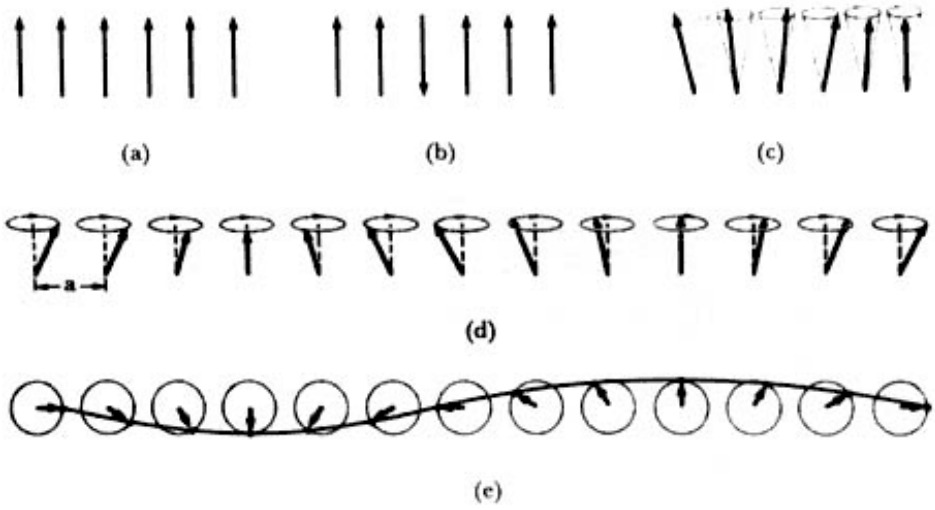


Figura 22. (a) Estado base de un ferromagneto simple: todos los espines paralelos. (b) una excitación posible: un espín se invierte. (c) Se forma una onda de espín: el extremo del espín precesa formando conos. (d) Una onda de espín vista en perspectiva. (e) Espines vistos desde arriba. La onda se dibuja por la punta de los espines.

Inicio

IV. EL MAGNETISMO EN LA NATURALEZA: SUS MANIFESTACIONES EN LO INANIMADO Y EN LOS SERES VIVOS

INTRODUCCIÓN:

LA MAGNETITA

RECORDEMOS que hace aproximadamente 2000 años el hombre observó en la naturaleza el primer fenómeno magnético: una piedra, el imán, que traía pedazos de hierro. Pasarían muchos años para aprender que todos los materiales tienen algún tipo de comportamiento magnético. El imán, cuyo nombre científico es magnetita, pertenece al tipo de material que tiene un ordenamiento magnético espontáneo. Es apenas en nuestro siglo que empezamos a entender el origen microscópico del magnetismo y que podemos decir algo sobre esta misteriosa piedra que despertó el espíritu investigador de nuestros antepasados.

Actualmente sabemos que la materia está formada por átomos. Como ya vimos, el átomo y aun los electrones, también pueden considerarse como pequeños imanes. Los átomos están distribuidos en el espacio en algún tipo de arreglo que recibe el nombre de red y que, en el caso de los materiales cristalinos, es periódica. Esto es, basta con conocer la colocación de los átomos en una cierta celda unitaria, ya que ésta se repite igual en el espacio: su traslación genera el sólido. En la mayoría de los materiales, los pequeños imanes están orientados al azar y el material no manifiesta magnetización neta. En el caso de los materiales ferromagnéticos, esquematizados en la figura 23(a) en dos dimensiones, los imanes se alinean en una cierta dirección. En el orden antiferromagnético, figura 23(b), la magnetización neta vuelve a ser cero como en el caso al azar, a pesar de que sí existe un orden. Finalmente, en la figura 23(c) se muestra el tercer tipo de orden magnético: ferrimagnetismo, que es intermedio entre los otros dos. Existe pues un orden alternado pero con imanes distintos, dando como resultado una magnetización total diferente de cero.

El imán o magnetita es un material ferrimagnético de las llamadas "ferritas" u "óxidos ferrimagnéticos", Fe_3O_4 que son materiales aislantes con muchas aplicaciones industriales. Desde luego que su primera aplicación tecnológica fue la brújula. El modelo más sencillo para explicar el ferrimagnetismo consiste en considerar dos subredes magnéticas intercaladas, como se ve en la figura 23 c. Fue Néel quien extendió a dos subredes el modelo que Weiss había ideado con gran éxito para explicar los materiales ferromagnéticos. La magnetita es un caso más complicado y hace falta considerar tres subredes magnéticas, como se puede observar en la figura 24, en la que se muestra un plano del material. A esta estructura se le conoce como espinela, donde los oxígenos rodean al hierro, bien en forma tetraédrica o bien en forma octaédrica. En una subred magnética los imanes o, por qué no llamarlos con el lenguaje moderno, los espines, tienen la misma dirección y sentido, pertenecen al mismo ión y presentan periodicidad en el espacio.

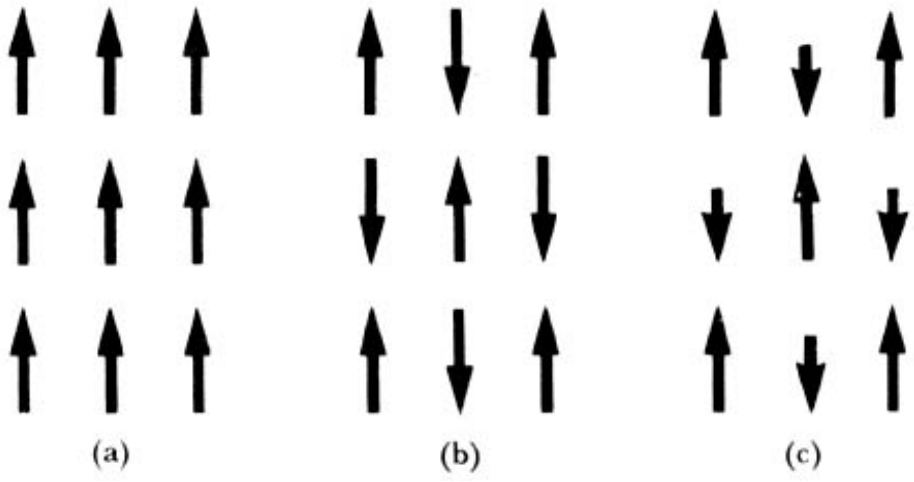


Figura 23. Modelos para materiales magnéticos: (a) Ferromagneto. b) Antiferromagneto. (c) Ferrimagneto.

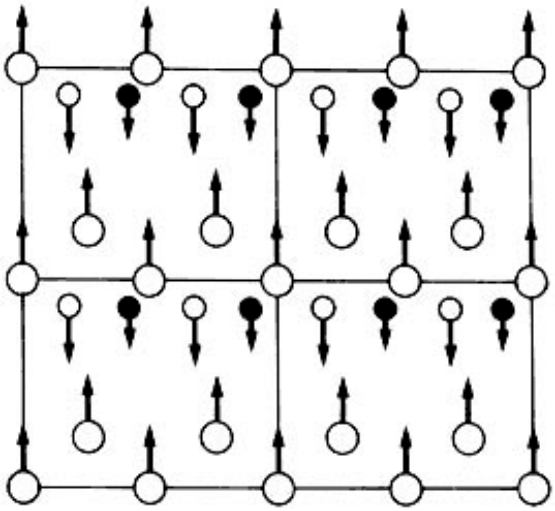


Figura 24. Plano de cuatro celdas de magnetita.

El descubrimiento de la brújula llevó al hombre al segundo gran fenómeno magnético: el comportamiento de la Tierra como un gran imán. Sin embargo, el por qué de este comportamiento fue un misterio durante muchos años.

LA TIERRA COMO UN IMÁN

Fue Gauss el primero en describir el campo magnético terrestre. Publicó la obra *Intensitas vis magnetical terrestris ad memsuram absolutam revocata* en 1832. Como resultado de sus estudios concluyó que más del 97% de la fuerza magnética que se observa en la superficie de la Tierra se origina en su interior. Un campo magnético puede ser producido por un imán permanente o por corrientes eléctricas, y alguna de esas dos causas debe ser la responsable. El núcleo de la Tierra parece estar compuesto principalmente de hierro y níquel, que son materiales ferromagnéticos a temperaturas ordinarias. Sin embargo, la temperatura del núcleo terrestre es sin duda superior a la crítica, arriba de la cual los ferromagnetos dejan de presentar un orden magnético. No puede suponerse, por lo tanto, que dentro de la Tierra hay un imán permanente. La explicación del magnetismo terrestre tendría que estar relacionada, por tanto, con las corrientes eléctricas que se generan en su núcleo.

En 1948, Bullard propuso una hipótesis que se ha llamado de "dínamo autoexcitado"; la figura 25 muestra un modelo sencillo para ilustrarlo.

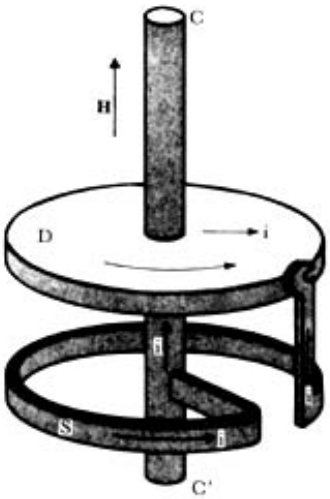


Figura 25. Esquema del modelo simple que ilustra el principio de la dínamo de disco autoexitante.

Un disco *(D)* gira sobre su eje *(CC')* en dirección contraria a las manecillas del reloj, en presencia de un pequeño

campo magnético **H** paralelo a *CC'*. De acuerdo con la ley de inducción de Faraday, se induce una fuerza electromotriz que depende de la velocidad de giro y del campo magnético. En la figura, el borde del disco está en contacto con un solenoide circular *(S)* que también gira en torno a *CC'*. La otra terminal del solenoide está conectada con el eje de rotación. Supongamos ahora que todo el dispositivo está hecho de metales que son buenos conductores de la electricidad, como de hecho lo son el hierro y el níquel. Debido a la fuerza electromotriz inducida, se producen corrientes eléctricas a través de *D*, y posteriormente *S*, *CC'* y *D* forman un circuito eléctrico cerrado. La corriente que fluye por el solenoide *(S)* produce un campo magnético paralelo al original **H,** incrementándolo. Este nuevo campo induce a su vez una fuerza mayor y el proceso anterior se repite. Así, un campo magnético pequeño, generado aun por casualidad, es mantenido e incrementado por este dínamo autoexcitado. Por supuesto que este proceso no puede hacer crecer el campo magnético indefinidamente, ya que hay pérdidas continuas de la corriente eléctrica debido a la resistencia de los materiales. Llega un momento en que el campo magnético alcanza un nivel estacionario, que es cuando las pérdidas compensan los incrementos. Si en el núcleo terrestre existiera un mecanismo semejante al dínamo descrito, el campo magnético terrestre se mantendría tal y como sabemos que sucede.

El modelo descrito es seguramente demasiado simplificado dada la complejidad de la situación. Ha habido muchos modelos que, basados en el mismo mecanismo, describen situaciones más complicadas, con combinaciones de varios tipos de dínamos. La presencia de varios de ellos involucra la dificultad de cómo acoplarlos, además de que los cálculos numéricos son de una gran dificultad. Sin embargo, el modelo de dínamo permanente ha sido ampliamente apoyado por expertos en geomagnetismo.

Hace más de 130 años que fueron medidas en forma sistemática la magnitud y la dirección del campo magnético terrestre. En la actualidad se usan aviones especiales para este propósito, además de satélites artificiales. Puede decirse ahora que la descripción es casi perfecta. Con base en los análisis de estos resultados se ha demostrado que el campo observado puede presentarse en forma aproximada como el producido por un imán hipotético cuyo eje se inclina ligeramente con respecto al eje de rotación, como aparece en la figura 5. Sin embargo, la intensidad, ubicación y dirección de este imán hipotético han cambiado apreciablemente.

Los datos han llevado a la conclusión de que el campo magnético terrestre es sumamente variable. Existe una indicación para estimar la intensidad del campo magnético terrestre que fue descubierta ya hace algunos años. En 1853, Melloni, en Italia, descubrió que las rocas volcánicas tienen una magnetización permanente bastante fuerte. Supuso que este magnetismo se debía a la acción que sobre ellas tuvo el campo magnético terrestre en el momento en que se enfriaban. Esta suposición fue posteriormente comprobada: la fuerte magnetización remanente de las rocas volcánicas recientes puede ser reproducida exactamente mediante el enfriamiento desde una temperatura alta, en presencia del campo magnético de la Tierra, resultando que la intensidad de la magnetización remanente adquirida es proporcional a la intensidad del campo magnético aplicado.

Las rocas ígneas se componen principalmente de magnetita con algo de óxido de titanio. Como ya lo hemos discutido al hablar de materiales ferromagnéticos, la magnetización de la magnetita y de las rocas que la contienen disminuye con el incremento de la temperatura y desaparece a una temperatura crítica llamada de Curie. Las partículas magnéticas en las rocas pueden ser magnetizadas fácilmente aun en presencia de un campo relativamente débil, a una temperatura justo por debajo del punto de Curie. Con un descenso en la temperatura se incrementa la intensidad de esta magnetización adquirida y a temperatura ordinaria se produce una magnetización estable y fuerte. En la figura 26 se muestra un resumen de las medidas de la intensidad del campo magnético de los últimos 9 000 años, a partir de estudios en ladrillos, cerámicas y lavas volcánicas. Comparado con datos actuales, se puede concluir que el campo magnético ha fluctuado desde el pasado alrededor de valores semejante a los de hoy.

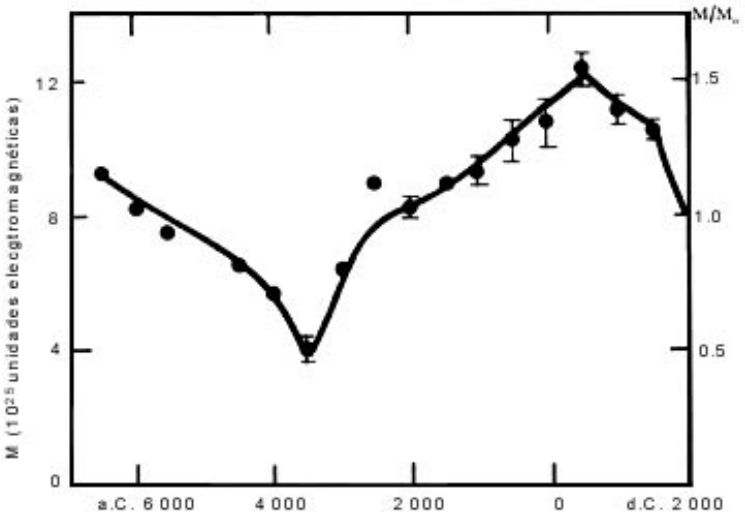


Figura 26. Movimiento del momento magnético de la Tierra (M) expresado en términos de su valor diario (Mo) a lo largo de los últimos nueve mil años.

Al estudio de la intensidad y la dirección del campo magnético de la Tierra en el pasado, por medio de rocas naturales, para determinar así sus cambios durante largos periodos de tiempo, se le conoce como paleomagnetismo. El desarrollo del paleomagnetismo llevó a un resultado sorprendente: el campo magnético ha sufrido diferentes inversiones en el pasado. Claramente la antigüedad de la lava aumenta con la profundidad. La dirección de la magnetización remanente de dos capas superiores (3.62 y 3.68 millones de años), así como de una muy profunda (4.5 millones de años) es prácticamente paralela a la del campo magnético terrestre actual.

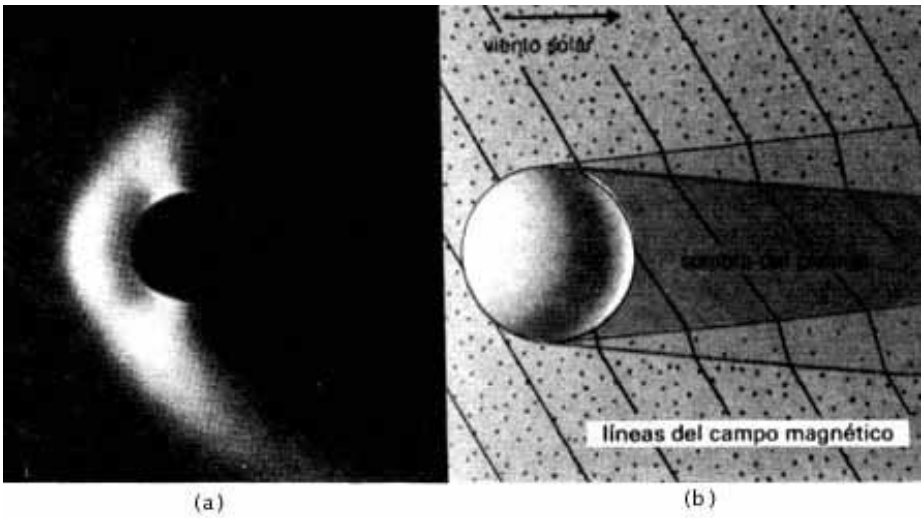


Figura 27. Relaciones entre el viento solar y el campo magnético de la tierra.

a) La relación entre el viento solar y el campo magnético se puede simular en el laboratorio haciendo incidir un flujo de plasma de electrones y de iones de helio sobre una esfera que contiene un electromagneto. El chorro de plasma es desviado en forma análoga a como sucede en la tierra cuando llega el viento solar.

b) Diagrama construido con base en los datos recopilados por satélites artificiales ilustrando la relación real entre el viento solar y el campo magnético de la Tierra. Los puntos en la figura representan el flujo de partículas que llega del Sol. Las líneas de fuerza del campo magnético están aplastadas del lado opuesto. A este fenómeno se le llama magnetósfera.

Sin embargo, la magnetización remanente de todas las capas intermedias está orientada en forma antiparalela a la actual. Se piensa que una inversión completa del campo magnético de la Tierra toma de 1 000 a 10 000 años. No se sabe a ciencia cierta el motivo de estas inversiones, pero sí se ha podido predecir estos resultados mediante un

modelo de los dínamos acoplados electromagnéticamente, extendiendo el modelo original descrito unos párrafos atrás. Se ha probado que, bajo condiciones apropiadas, un acoplamiento entre dos sistemas de dínamos autoexcitantes puede causar inversiones repetidas del campo magnético. Sin embargo, el problema de la inversión del campo sigue estando abierto, así como la discusión de las implicaciones que este fenómeno posee.

Una importante utilidad del campo magnético terrestre es que nos protege del viento solar. El viento solar es un plasma, gas de hidrógeno casi perfectamente ionizado, que emana del Sol, habiendo sido parte de la corona solar. La velocidad del flujo del plasma es de 300 a 400 km/seg en condiciones normales y puede llegar a 800 km/seg en una tormenta. En la figura 27 se muestra un ejemplo de una simulación de la interacción entre el viento solar y el campo magnético. Cuando el modelo de la Tierra no tiene campo, el plasma hace impacto directo con la superficie.

En cambio, cuando se le conecta un fuerte imán, el plasma se desvía y se forma una cavidad alrededor del modelo de la Tierra. La enorme cavidad natural en torno a la Tierra es conocida actualmente como la magnetósfera y su larga cola debida al viento solar en dirección opuesta al Sol es llamada cola geomagnética. Las partículas cargadas, principalmente electrones y protones, quedan atrapadas en diferentes "cinturones" de energía llamados cinturones Van Allen. Sus órbitas están confinadas en un plano ecuatorial alrededor de la Tierra debido al campo magnético. Hay dos cinturones de electrones, aproximadamente a 2 000-5 000 y 13 000-19 000 kilómetros sobre la superficie de la Tierra, y los protones parecen estar distribuidos en capas intermedias. Las partículas en las capas externas provienen principalmente del viento solar, pero dos de las capas internas están formadas por rayos cósmicos.

Así pues, el campo magnético terrestre constituye una defensa para la Tierra de las partículas cargadas que permanecen en órbitas que oscilan de norte a sur del ecuador magnético en los cinturones Van Allen.

¿Qué sucedería durante una inversión de la dirección del campo como la que hemos mencionado? Necesariamente habría un periodo grande de años en que el campo magnético sería muy pequeño o nulo y las radiaciones sobre la superficie muy intensas. Ha habido muchas especulaciones sobre esto, unidas a la evolución de las especies. Tal vez la radiación intensa al penetrar en las células logre alterar las moléculas de ADN de los cromosomas, modificando las características hereditarias de los seres vivos. Tal vez puedan desaparecer unas especies y aparecer otras. Ciertamente, éste no podría ser considerado como el mecanismo único para la evolución, pero podría colaborar a entender la súbita aparición o extinción simultánea de algunas especies en todo el mundo, en sitios donde los argumentos de adaptación al medio no son válidos por tratarse de medios muy variados. La verificación de estas hipótesis está en proceso y requiere de muchas observaciones en lugares adecuados en donde se pueda afirmar que el magnetismo original no ha sido alterado.

BACTERIAS MAGNÉTICAS

Hace poco tiempo se descubrió una evidencia más directa que el mencionado efecto del magnetismo terrestre sobre los seres vivos. Se descubrió, en cierta medida en forma accidental, que existen bacterias que utilizan el geomagnetismo para orientarse. Se estaba estudiando una especie de bacterias que suelen habitar en el lodo marino y se observaron microorganismos que migraban muy rápidamente hacia un lado de la gota de lodo. Primero se pensó que era un efecto debido a la luz proveniente de una ventana en el noroeste del laboratorio, pero pronto se dieron cuenta que la luz no podía ser la causa, pues siempre se movían en la misma dirección, aunque se cambiara la fuente luminosa. Se les ocurrió acercar pequeños imanes a la gota y la dirección del movimiento se alteró inmediatamente. Era el geomagnetismo el causante de la migración de las bacterias.

Este tipo de microorganismos se encuentran en los sedimentos lodosos, tanto salados como de agua dulce, de todo el mundo. Presentan cadenas de cristales de magnetita del tamaño de un monodominio (Figura 28). Estas células hacen que las bacterias tengan un momento magnético neto que se alinea con el campo magnético terrestre. En los hemisferios norte y sur, donde el campo magnético terrestre tiene una componente vertical mayor que la horizontal, su componente magnética les sirve para dirigirse al fondo, hacia el sedimento y áreas anaeróbicas que favorecen su crecimiento. Para comprobar esto se compararon bacterias crecidas en el hemisferio norte, con crecidas en el hemisferio sur, y aún más, con bacterias del ecuador. Al llevar bacterias del sur al norte, éstas se dirigían a la superficie en lugar de al fondo (no hay que olvidar que la dirección del campo magnético es opuesta en el norte y el sur). En el ecuador se encuentran bacterias de ambos tipos, que podríamos llamar tipo norte y tipo sur. Ahí el campo, por su dirección, no ayuda a distinguir el fondo de la superficie, pues tiene una dirección prácticamente paralela a la superficie. Hay otros microorganismos, como las algas, que presentan comportamiento

magnético, y por tanto se presenta la probabilidad de una nueva taxonomía basada en comportamientos magnéticos.

Figura 28. Fotografía de microscopio electrónico de una sección de bacteria magnética delgada. Se ven las cadenas de cristales magnéticos. La barra mide 250 nm.

Si se cultivan estas bacterias en un medio sin hierro, se observa que no presentan propiedades magnéticas, aunque se conserva la posición de las células magnéticas.

Se han hecho diferentes pruebas que han mostrado que el hierro se encuentra en forma de magnetita, pero con cierto porcentaje de vacancias. Es importante señalar el hecho de que el tamaño de los cristales de magnetita (40nm) corresponde al de un solo dominio y que es imposible producir tecnológicamente un cristal de ese tamaño. La respuesta de estos monodominios es directa, no por inducción. Son brújulas biológicas. También se ha encontrado magnetita en el abdomen de abejas vivas y en el cráneo de pichones, pero no se ha podido demostrar su relación con su sentido de orientación. Sin embargo, recientemente, al estudiar los mecanismos de migración de peces, se encontraron respuestas condicionadas por el campo magnético terrestre en el atún de aleta amarilla y se detectaron y caracterizaron cristales de magnetita provenientes de un tejido que se encuentra ligado a un hueso del cráneo del atún. Se llevaron a cabo gran número de pruebas y se comprobó que la acumulación de magnetita era común a la especie y similar a la forma en que se da en las mencionadas bacterias. También confirmaron la conexión entre el material magnético y el sistema nervioso del pez, y por la forma en que las partículas están organizadas, se concluye que el atún probablemente tiene una navegación muy precisa.

La orientación animal ha sido uno de los grandes misterios de la naturaleza y resulta apasionante la posibilidad, que empieza a confirmarse, de que la brújula, ya sea construida o natural, mueva a todos los seres vivos sobre la superficie del planeta.

V. EL MAGNETISMO Y SUS APLICACIONES EN EL MUNDO MODERNO

INTRODUCCIÓN:

LA ÉPOCA MODERNA

EN ESTE capítulo presentaremos algunas de las aplicaciones del magnetismo y su influencia en el mundo moderno. Podemos decir que la revolución que está sufriendo el mundo en el campo tecnológico y que afectará sin duda toda la vida cultural, política y social de lo que resta del siglo y del subsiguiente, es producto en gran medida del avance de la física. Esto se ve de manera particular en el desarrollo de la microelectrónica y de otras áreas de alta tecnología que utilizan los principios del electromagnetismo en el diseño de aparatos y sistemas de información, medición, etc. Asimismo, la creación de nuevos materiales y su aplicación se basa en gran medida en el conocimiento logrado en el electromagnetismo y la mecánica cuántica.

Por supuesto que el magnetismo halló aplicación desde el siglo pasado. El teléfono y el telégrafo alrededor de 1880 eran aparatos activados por baterías y, basados en el descubrimiento de Oersted, las grandes aplicaciones a la ingeniería de la inducción electromagnética son el motor eléctrico y el dínamo. El mismo Henry, codescubridor de la inducción electromagnética, había construido un motor en 1831 y diseñado juguetes primitivos. Edison inventó un generador bipolar en 1878, un año antes de inventar el filamento de luz eléctrico. El hecho de que hubiera un generador de potencia hizo que el uso de luz eléctrica se difundiera rápidamente. Con el experimento de Hertz se sentaron las bases para la transmisión inalámbrica de ondas de radio. De la misma forma, aparatos como la radio y la televisión utilizan muchos de los conocimientos que sobre electromagnetismo se generaron en las primeras decenas del siglo XX.

Las aplicaciones que se realizan en la actualidad son variadísimas y la ciencia del magnetismo se ha vuelto central en nuestra tecnología como medio ideal de almacenamiento de datos en cintas magnéticas, discos magnéticos y burbujas magnéticas. Además, se empieza a aplicar en la medicina. Como ya lo mencionamos, el desarrollo de nuevos materiales y su aplicación a modernas tecnologías es uno de los dínamos que mueven a la sociedad posindustrial representada por los Estados Unidos y, sobre todo, por Japón, donde, por cierto, la llegada de Ewing a fines del siglo pasado motivó un esfuerzo sin precedente de Honda para desarrollar el estudio del magnetismo. Por su parte, los otros países desarrollados también poseen un gran acervo de conocimientos para obtener un considerable avance en el campo. En cuanto a los países subdesarrollados el gran desafío consiste en utilizar en forma óptima los escasos recursos (sobre todo humanos) que se tienen para no quedar a la zaga de esta explosión científica y tecnológica.

A continuación presentaremos en forma selectiva algunos de los usos del magnetismo en diversas áreas. Esta descripción no pretende cubrir todos los temas de aplicación del magnetismo, ni mucho menos asegurar que los temas que tratamos están desarrollados exhaustivamente. Sólo queremos presentar un panorama de las inmensas posibilidades que en este campo existen cuando la ciencia y la tecnología se conjugan en forma imaginativa. Para esto examinaremos el área de nuevos materiales magnéticos sólidos, los ferrofluidos, la tecnología en informática basada en el magnetismo, la resonancia magnética nuclear en la medicina y el efecto de campos magnéticos en tecnología nuclear.

ALEACIONES Y COMPUESTOS CRISTALINOS

Una de las ramas importantes del magnetismo se ocupa de los efectos que influyen en la estructura y formación de dominios magnéticos tanto en bulto como en películas delgadas. En forma específica, del comportamiento de materiales magnéticos granulares que no contengan dominios, sino que sean dominios únicos (como en el caso de las bacterias discutido anteriormente). Esto es muy importante, ya que sus propiedades son más fáciles de entender. Cuando se dice que un material es magnéticamente duro significa que las partículas que lo componen son muy anisotrópicas y, por lo tanto, que su rotación se dificulta. De esta manera, una gran cantidad de materiales como rocas, magnetita, etc., han sido investigados y utilizados sobre todo en medios de grabación magnética.

Existe un gran interés por estudiar aleaciones compuestas por materiales magnetoelásticos especiales que tengan

aplicaciones en sellos metalo-vidriosos, tubos de guía de onda, etc. La cancelación que ocurre entre la expansión térmica positiva de la mayoría de los materiales y la contribución magnética negativa origina que en aleaciones llamadas invar (como fierro-níquel) expansión térmica sea casi nula. Otras aleaciones como níquel-platino, que es cristalina, y fierro-boro, que es amorfa, muestran una gran potencialidad para aplicaciones como las arriba mencionadas.

Otra aplicación de aleaciones magnéticas amorfas proviene de que se necesitan materiales magnéticos a los se les pueda cambiar su dirección de magnetización con poco gasto de energía. Estos materiales encuentran su uso en transformadores y se necesitan para minimizar pérdidas por calor. En aleaciones magnéticas producidas por templado rápido y de composición fierro-níquel metaloide (como silicio, bario, etc.) se minimiza la formación de anisotropías de los dominios magnéticos y el material es magnéticamente más suave.

El llamado mérito de un imán permanente está en relación con la intensidad de su magnetización permanente. El obtener aleaciones permanentes de, por ejemplo, hierro-neodinio-boro, ya sea por templado rápido o por técnicas menos sofisticadas, ha permitido nuevas aplicaciones. La extrema dureza de estos materiales tiene su origen en la estructura cristalina tetragonal, la cual aumenta la anisotropía magnética. La aplicación de estos materiales aún no ha sido evaluada completamente.

Transductores que transformen movimientos mecánicos en señales eléctricas son fundamentales para la industria moderna. Los transductores basados en el magnetismo utilizan el hecho de que al aplicar un esfuerzo las propiedades magnéticas del material utilizado como transductor varían en forma proporcional. A esto se le conoce como magnetostricción. Los nuevos compuestos policristalinos muestran una magnetización 50 veces mayor que el níquel. Las aplicaciones en la industria militar son obvias (detección de submarinos).

De lo anteriormente expuesto es claro que la búsqueda de materiales magnéticos con propiedades específicas para cientos de aplicaciones está en pleno auge.1 Sin lugar a dudas la computadora ayudará al diseño y estudio de materiales sólidos con un comportamiento extremo. A continuación estudiaremos con más detalle un material líquido extremadamente interesante, tanto desde el punto de vista científico como desde el tecnológico.

FERROFLUIDOS

La idea de crear un fluido coloidal con propiedades ferromagnéticas surgió en los años sesenta. Estos fluidos consisten en partículas finamente divididas de magnetita o cobalto suspendidas en un medio aceitoso, como el kerosene (véase Figura 29). Para evitar que estas partículas se unan y el coloide se coagule, se adiciona un tensoactivo o agente dispersante como el ácido oleico. Las partículas deben ser pequeñas, del orden de 100 Ångströms. Estas partículas rodeadas de tensoactivo interactúan entre sí como si fueran esferas duras que llevaran un dipolo magnético. De esta forma el coloide tiene propiedades muy interesantes cuando se le coloca en un campo magnético (por ejemplo, véase Figura 30).

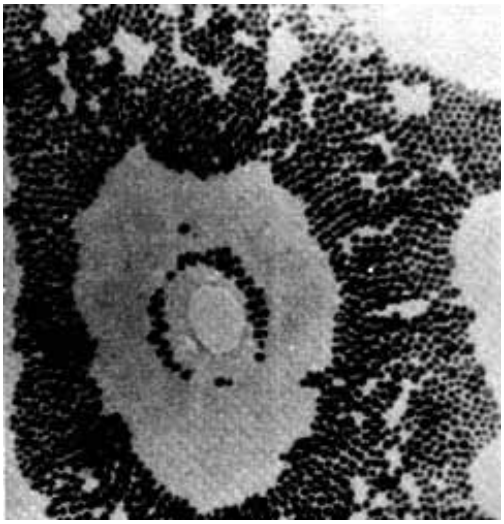


Figura 29. Partículas de cobalto para ferrofluidos.

Este coloide, además de poseer las formas de energía inherentes a todo flujo: energía de presión, energía cinética y energía gravitacional, tiene una energía ferromagnética al interactuar con un campo magnético. La suma de estas energías es constante, según lo demostró Bernoulli en 1738. El juego de todas estas energías permite una serie de útiles aplicaciones (Figura 31). Por ejemplo, la interacción entre magnetismo y presión puede ser utilizada para diseñar un tapón magnético en un tubo que une los recipientes con gas a distintas presiones. Un tapón hecho con fluido normal se movería hasta que las presiones quedaran equilibradas. Un ferrofluido se mantiene en su posición enfocando un campo magnético, ya que si el tapón se mueve un poco hacia la región de baja energía, la fuerza magnética lo detendrá. Al ser la energía cinética y gravitacional constantes, el decremento de la energía debido a la presión debe ser compensado por un aumento de energía magnética y viceversa. Estos sellos se utilizan cuando un eje rotante debe pasar por un compartimiento herméticamente cerrado. Esta fue la primera aplicación de los ferrofluidos y posteriormente ha sido aplicada a láseres de gas. También se han diseñado sellos en etapas múltiples, que pueden resistir presiones 60 veces mayores a la atmosférica.

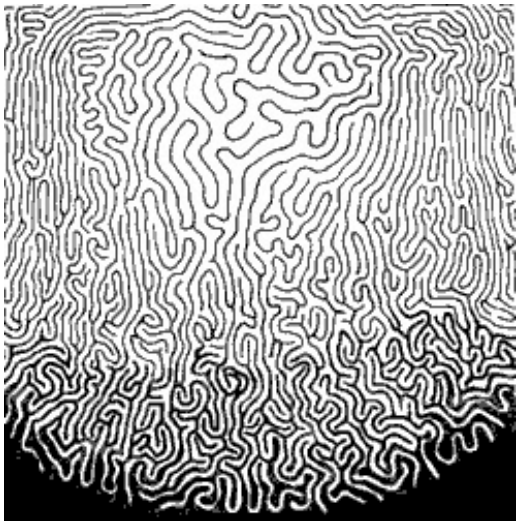


Figura 30. Se forman patrones muy complejos cuando a un líquido magnético (oscuro) y uno no magnético (blanco) se les aplica un campo magnético horizontal. Si no hay campo aplicado, el líquido magnético permanecerá en el fondo. Cuando se aplica un campo aparecen perturbaciones. El dibujo representa el fluido a los 90 seg. De haber conectado el campo.

Una variante del sello ferrofluídico de presión se ha empleado en el diseño de bocinas. En la mayoría de éstas, el elemento más importante es una bobina cilíndrica, ajustada en un magneto permanente con un hueco que le permite moverse. El calor producido en el alambre puede ser disipado mejor si se coloca un líquido en el hueco en lugar de aire. Un fluido ferromagnético no se caerá, pues el campo magnético lo sostendrá.

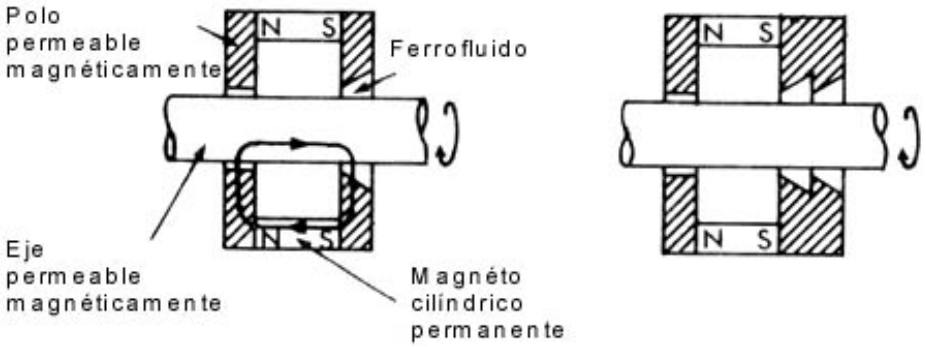


Figura 31. Aplicaciones de ferrofluidos.

Otra de las aplicaciones importantes de los ferrofluidos es su utilización en procesos de separación de materiales que difieren en su densidad. Los métodos ordinarios de separación utilizan líquidos pesados, pero son tóxicos y no pueden flotar substancias de alta densidad.

La levitación magnética puede hacerlo y de hecho se usa para levitar partes no ferrosas de autos, en la

incineración de desperdicios sólidos, etc. Si uno coloca una esfera no magnética dentro de un ferrofluido menos denso, ésta se irá al fondo. Sin embargo, al colocar los polos iguales de dos imanes arriba y abajo del ferrofluido respectivamente, la esfera sube hacia el centro del recipiente que contiene el ferrofluido y allí se queda. Esto se debe a que la suma de la energía magnética y de presión es constante. Una variante del sistema es la levitación de un objeto magnético. Aquí el campo es proporcionado por el objeto mismo. Recientes aplicaciones de esto incluyen la separación de diamantes de la arena y la guía de taladros de perforación petrolera con un acelerador subterráneo en el cual la masa sensible es levitada en un ferrofluido.

Los ferrofluidos también han hallado aplicación en impresión de tinta por chorro, control de carátulas alfa-numéricas, etc. El desarrollo potencial de una máquina magnetocalórica que utilice como fluido de trabajo un ferrofluido es una fascinante posibilidad.

EFECTO DE CAMPOS MAGNÉTICOS EN METALES LÍQUIDOS

En la tecnología nuclear, los reactores de cría juegan un papel muy importante para la producción de energía, sobre todo en países como Francia y Alemania. Estos reactores se llaman así porque al operar producen más combustible nuclear del que usan y lógicamente esto es una gran ventaja de su operación. Para enfriar estos reactores se utilizan metales líquidos. Esto incidirá en el diseño del reactor pues, dados los campos magnéticos presentes en el mismo, el flujo del metal puede seguir patrones sorpresivos. De esta manera se estudia el flujo y el comportamiento de metales líquidos en tuberías de distintas secciones transversales, sean cilíndricas o rectangulares, rodeadas de campos magnéticos de intensidad variable. Los patrones de flujo afectan la razón de transferencia de calor, presión, etcétera.

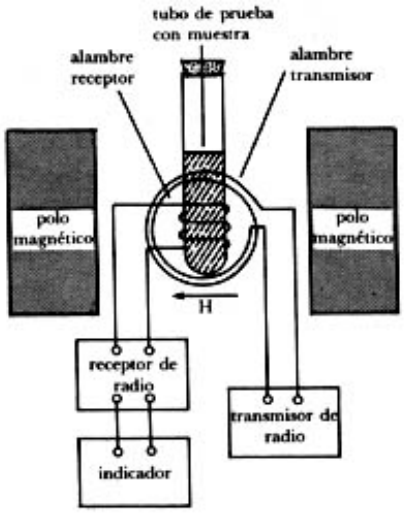


Figura 32. Aparato simplificado para el experimento básico de resonancia magnética nuclear.

RESONANCIA MAGNÉTICA NUCLEAR

Si un núcleo atómico que posee espín es colocado en un campo magnético fuerte, su momento magnético procesa alrededor de la dirección del campo. La componente del momento en el eje definido por el campo está cuantizada, o sea, toma solamente valores discretos. De esta manera, sólo ciertas energías son permitidas. Al pasar de un estado de energía a otro el núcleo radía a ciertas frecuencias. En 1946, Purcell y Bloch desarrollaron la resonancia magnética nuclear (RMN) aprovechando este hecho. Esos investigadores utilizaron un transmisor de radiofrecuencia para producir un campo electromagnético oscilante que induce transiciones entre los diversos niveles de energía de los núcleos de una muestra. Esto ocurre cuando, por un efecto de resonancia, la frecuencia del campo oscilante iguala a la frecuencia de transición entre estos niveles (frecuencia de Larmor), la cual depende tanto del momento magnético de núcleo como del campo magnético en el núcleo.

Figura 33. Una imagen de resonancia magnética nuclear de una rebanada de abdomen. Diferencias de brillo indican diferente entorno, por ejemplo, distinguen grasa de músculo.

Al incidir el campo oscilante, la muestra absorbe energía del mismo y un gran número de núcleos se encuentran en niveles de energía más alta que en su estado de equilibrio. El sistema tiende a regresar a estados de energía más baja, no sólo emitiendo radiación, sino por medio de procesos de relajamiento no radiactivos.

Esto significa en términos semiclásicos que la precesión tiende a decaer. Cuando esto sucede, la fuerza electromotriz inducida produce una señal que es amplificada y detectada. Para obtener información de la posición espacial de las partes de la muestra, el campo aplicado debe poseer un gradiente que dé origen a una modulación de la frecuencia de respuesta. Al variar el gradiente se genera la respuesta como función del vector de onda de la señal RMN en dos o tres dimensiones. Al transformar esta señal al espacio real se obtienen imágenes. Un esquema de un aparato para RMN se muestra en la figura 32.

Ahora bien, los tejidos tienen la misma densidad de hidrógeno, que es el núcleo al cual se aplica la RMN. Por lo tanto, no se obtendría mucha información si los tiempos de relajamiento de la señal no dependieran de otros factores. Se ha encontrado, sin embargo, que estos tiempos dependen de factores químicos y físicos que varían de tejido a tejido. Existen de hecho dos tiempos de relajamiento. El primero, llamado T1, está relacionado con el restablecimiento del equilibrio térmico de los espines excitados con el resto del cuerpo. El segundo, T2, que es más pequeño, se relaciona con procesos que contribuyen a la pérdida de coherencia de fase entre los diversos espines del sistema. Seleccionando secuencias de pulsos de excitación y escogiendo tiempos de relajamiento adecuados, se puede modular la intensidad de la señal RMN que depende de estos factores físicos y químicos y así obtener información invaluable. Parece factible que se puedan observar cambios en la frecuencia de Larmor que resultan de cambios en el medio químico del tejido, con lo que se puede obtener información acerca de procesos metabólicos. De esta forma la señal RMN permite estudiar tejidos desde diversos puntos de vista. Esto complementa otras técnicas radiográficas. Por ejemplo, la tomografía computarizada es muy sensible a detalles de morfología, aunque no hace distinciones entre un sujeto vivo o un cadáver. La RMN será vital en el futuro para estudiar la fisiología y las propiedades funcionales del cuerpo (Figura 33). Otra de sus incipientes aplicaciones es el estudio del flujo de fluidos en rocas porosas, conocimiento vital en la recuperación terciaria de petróleo. Es previsible que el costo de los aparatos de RMN disminuya con el advenimiento de materiales superconductores de alta temperatura crítica.

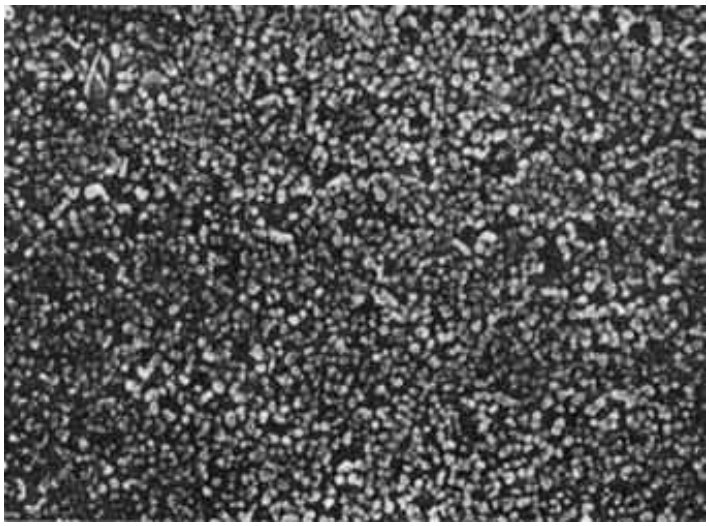


Figura 34. Partículas en una cinta magnética. En la foto superior son partículas de (γ—Fe_2O_3) en forma de aguja en un disco flexible. En la inferior son partículas magnéticas isotrópicas en una cinta.

TECNOLOGÍA DE INFORMACIÓN MAGNÉTICA

Indudablemente ésta es la aplicación en donde el magnetismo ha permitido un desarrollo mayor y más impresionante, ya que ha generado una industria de 25 000 millones de dólares al año, la cual crece a un ritmo de 20% anual. Su potencial es tan grande que desafía la imaginación, y lo hecho hasta ahora parece ser sólo el principio. La tecnología de información magnética incluye tres campos: grabación magnética, grabación optomagnética y burbujas magnéticas.

GRABACIÓN MAGNÉTICA

El almacenamiento de información vía grabación magnética se realiza en cintas magnéticas, discos flexibles *(floppy disks)* y discos duros. Una cabeza de grabación convencional consiste en un material magnético de alta permeabilidad alrededor del cual pasa una corriente por un alambre. El campo magnético en la brecha magnetiza el medio magnético en dirección del campo. Cambiando la dirección de la corriente se pueden magnetizar diferentes regiones del medio en direcciones opuestas y por tanto se tiene un código de información binario. Para leer esta información se mueven la cabeza y el medio en relación una al otro y al interceptar la cabeza al campo magnético del medio se generan pulsos eléctricos por la ley de Lenz. En todos los medios de grabación los parámetros importantes son la densidad de información, la razón de transferencia de datos y, por supuesto, el costo. Entre los factores que limitan estos parámetros, especialmente el primero, está la interacción entre la cabeza y el medio. Esto se debe a que el campo magnético no puede ser enfocado y, por lo tanto, para aumentar la

densidad de grabación se necesita acercar la cabeza al medio, causando problemas graves. Para subsanar estos problemas se han usado partículas alargadas de Fe_2O_3. Para mejorar todavía más la grabación se incluyen partículas de óxido de cromo o cobalto (Figura 34).

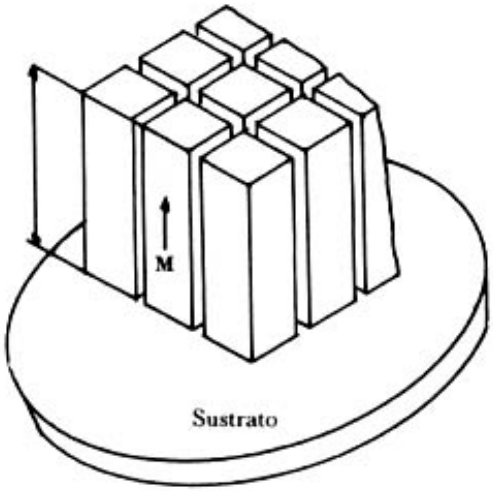
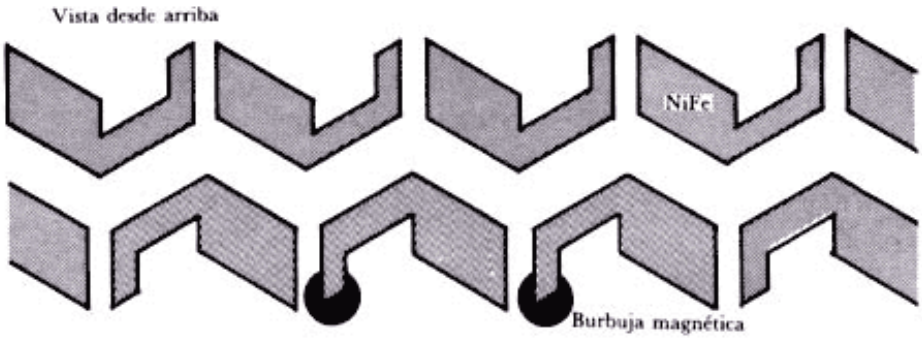


Figura 35. Un modelo de columnas para películas de Co-Cr.

Como la grabación longitudinal ordinaria produce también magnetización no uniforme con componentes perpendiculares al medio, ya sea cinta o disco, los japoneses han tratado de diseñar medios que puedan ser grabados perpendicularmente. Se han usado películas de cobalto-cromo fabricadas por chisporroteo, lo cual produce cristales hexagonales ricos en cobalto, perpendiculares a la película. No se sabe si estos materiales son dominios o partículas (Figura 35).



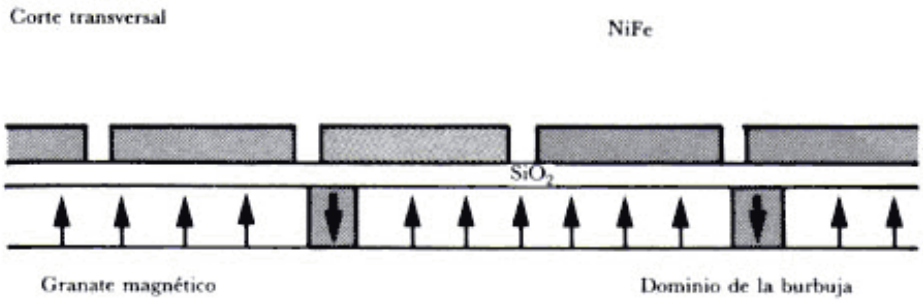


Figura 36. En presencia de un campo magnético rotante, estas estructuras prefabricadas de una aleación níquel-hierro hacen que se muevan las burbujas magnéticas en películas de granate.

GRABACIÓN OPTOMAGNÉTICA

En este sistema la lectura y grabación se hace con un rayo láser. El sistema es mecánicamente simple y la densidad de información está limitada por la longitud de onda del láser. Para grabar, un rayo de luz láser incide sobre una delgada película magnética. El láser calienta una región y alinea su momento magnético con un campo magnético aplicado. Para leer la información se usa luz de menor intensidad que la utilizada para escribir. Cuando la luz pasa por el material, su plano de polarización gira debido al efecto Faraday. La dirección de rotación depende de la dirección de magnetización del material y de esta forma, usando un polarizador, uno puede transformar rotaciones en direcciones distintas en diferencias de intensidad. Como materiales magnetoópticos se utilizan aleaciones amorfas de tierras raras y metales. Como ya mencionamos, estos materiales son nuevos y se requiere de mucha investigación para entenderlos.

TECNOLOGÍA DE BURBUJAS MAGNÉTICAS

Las memorias de burbujas magnéticas pueden representarse como pequeños dominios móviles cuya polaridad es contraria a la de sus alrededores.

La presencia o ausencia de una burbuja puede ser interpretada como un código binario. Estas memorias son ventajosas con respecto a otros sistemas de grabación en tiempos de acceso, costo y confiabilidad. Las memorias de burbuja son microestructuras, de cerca de una micra, de una aleación níquel-hierro producidas litográficamente en películas de granate, como se muestra en la figura 36. Un campo magnético rotante aplicado en el plano de la película induce polos magnéticos en galones asimétricos de la aleación y de esta manera el domino de la burbuja se propaga. Tal vez en el futuro la implantación de iones pueda substituir a la aleación. Hay que subrayar que esta tecnología ha sido acaparada prácticamente por los japoneses. Aparte de usar un campo magnético para propagar las burbujas, se pueden usar corrientes en planos conductores para producir el campo. El desarrollo de materiales de densidades grandísimas ha generado la investigación de las llamadas líneas de Bloch, que son recodos en las paredes de los dominios de las burbujas. Se cree que se podrían almacenar densidades de información de 10^9 bits/cm2, siendo el bit la unidad de información. Se piensa también que materiales amorfos pueden soportar burbujas de centésimas de micra y no se sabe hasta dónde se puede llegar. El tiempo de acceso se aproximará a 400 megabits/seg.

Este somero examen muestra el efecto brutal que las nuevas tecnologías basadas en el uso del electromagnetismo tienen y tendrán en el mundo moderno. Entre otras cosas, el control de la fusión nuclear se basa en gran medida en un conocimiento profundo del campo magnético. Sin duda presenciamos una revolución que tendrá un efecto mayor que la Revolución Industrial y cuyas consecuencias nadie puede prever. El humilde comienzo del magnetismo como ciencia ha desembocado hoy en un torrente de conocimiento que la humanidad debe saber controlar.

[Nota 1] [<--

1. Prueba de ello es la frenética actividad en el campo de materiales superconductores de alta temperatura crítica.

Inicio

BIBLIOGRAFÍA

REFERENCIAS GENERALES

Cabrera Blas, *El Magnetismo de la Materia*, Institución Cultural Española, Buenos Aires, 1974.

Hadfield B. Editor, *Permanent Magnets and Magnetism*, Wiley, New Vork, 1962.

Mattis D., *The Theory of Magnetism*, Harper Row, New York, 1965.

Purcell E., *Electricity and Magnetism*, Berkeley Physics Course, vol. 2, Mc Graw , Hill, 1965.

Stoner E. C., *Magnetism and Matter*, Methuen, Londres, 1934.

Van Vleck J., *The Theory of Electric and Magnetic Susceptibilities*, Oxford University Press, Oxford, 1932.

ARTÍCULOS ESPECIALIZADOS

Blakemore R. P., "Magnetotactic Bacteria", *Science* 190, 377 (1925).

Estrada L., "La evolución de nuestro conocimiento en Magnetismo", *Naturaleza 1*, 6 (1968).

Frankel R. B., Blakemore R. P., de Araujo FFT., Esquivel D. M. S. y Danon J., "Magnetotatic Bacteria At The Geomagnetic Equator", *Science 212*, 1269 (1981).

Kryder M. y Bortz A., "Magnetic Information Technology", *Physics Today 37*, 30 (1984).

Kryder M. y Thomas D., "Proceedings IEEE International Conference on Computer Design", *IEEE Comp. Soc. Press*, Silver Springs, Md. (1983).

Nagaha T., "El campo magnético terrestre", pág. 149 en el *Redescubrimiento de la Tierra*, CONACYT, México (1982).

Naturaleza, "Órgano sensible en el atún", *Naturaleza 15*, 264 (1984).

Pykett I., "Nuclear Magnetic Resonance Imaging in Medicine", *Scientific American 246*, 54 (1982).

Rosenzweig R., "Magnetic Fluid", *Scientific American 246*, 1215 (1982).

Van Vleck J., "A Lyrical Account of Magnetism", *Int. J. of Magnetism I*, 1(1970).

Inicio

COLOFÓN

Este libro se terminó de imprimir y encuadernar en el mes de agosto de 1997 en los talleres de Impresora y Encuadernadora Progreso, S.A. (IEPSA), calzada de San Lorenzo 244, 09830 México, D.F.

Se tiraron 3 000 ejemplares

La Ciencia para Todos

es una colección coordinada editorialmente

por *Marco Antonio Pulido*

y *María del Carmen Farías.*

Inicio

CONTRAPORTADA

Dado que el magnetismo es uno de los pilares que sostienen la compleja estructura de la ciencia y la tecnología modernas, los doctores Julia Tagüeña y Esteban Martina decidieron escribir el presente libro, destinado a ofrecer una visión panorámica del tema. **De la brújula al espín** tiene, pues, el objeto de interesar a los estudiantes y al público en general mediante la exposición —la más sencilla posible— de las teorías que explican el funcionamiento de muchos de los aparatos e instrumentos de uso cotidiano: brújulas, por supuesto, grabadoras, televisores y, en general, la tecnología de la información magnética. "El magnetismo —afirman los autores— es una rama de la física que se encuentra en plena expansión y en la que caben aún infinidad de interrogantes."

La electricidad y el magnetismo son aspectos diferentes de un mismo fenómeno, pero la relación entre ambos no se comenzó a investigar en forma sistemática hasta el siglo XIX. Sin embargo, la curiosidad y los estudios sobre el magnetismo se remontan a la Antigüedad clásica: una leyenda asegura que el pastor griego Magnes (de allí el nombre) quedó pegado a la tierra pues los clavos de sus zapatos fueron atraídos cuando pasó sobre un terreno compuesto por el mineral llamado magnetita. Tales de Mileto, hacia el siglo VI a. C., habla ya del imán en forma detallada y Platón en su diálogo **Ion** hace decir a Sócrates que la magnetita no sólo atrae anillos de hierro sino que les imparte un poder similar para atraer otros anillos y formar cadenas, el fenómeno ahora llamado rnagnetización por inducción. No menor fue el interés de los chinos por el magnetismo, que los llevó a la invención de la brújula.

La ruta de la moderna teoría del magnetismo está marcada por los nombres siguientes: William Gilbert de Colchester, René Descartes, Charles Coulomb y James Clerk Maxwell, camino que los doctores Tagüeña y Martina desbrozan y, para su mejor comprensión, lo desglosan en cuatro apartados: el magnetismo y la luz, el magnetismo y el átomo, el magnetismo en la naturaleza y el magnetismo en la tecnología.

Julia Tagüeña obtuvo su licenciatura en física en la UNAM y su doctorado en la Universidad de Oxford; se desempeña como investigadora en el Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM. Esteban Martina se licenció y doctoró en física en la UNAM y en la actualidad es investigador en el Instituto de Física de esta misma casa de estudios.

En la portada: Brújula que data del año 1518, cuya nacionalidad y creador son aún desconocidos.

Inicio